

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



Grado en Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y construcción de un dron como
plataforma de monitorización medioambiental**

Autor: Daniel Serena Sanz

Tutor: Stefan Palzer

junio 2019

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de la propiedad intelectual.

La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (*arts. 270 y sgts. del Código Penal*).

DERECHOS RESERVADOS

© 20 de Junio de 2019 por UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Francisco Tomás y Valiente, nº 11

Madrid, 28049

Spain

Daniel Serena Sanz

Diseño y construcción de un dron como plataforma de monitorización medioambiental

Daniel Serena Sanz

IMPRESO EN ESPAÑA – PRINTED IN SPAIN

A mi familia y a mis compañeros.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer el esfuerzo y empeño que han demostrado todas las personas del departamento donde he hecho este TFG, empezando por mi tutor Stefan Palzer, por guiarme y ayudarme a realizar este trabajo, a Álvaro Ortiz por sus consejos de recién doctorado y su ingenio que ha arreglado algún que otro problemilla y, sobre todo, a Patricia González, mi compañera de ideas y sufrimiento durante todo este proceso de investigación y desarrollo de nuestro trabajo de final de grado.

Por otro lado quiero agradecer el apoyo que he recibido de mi familia ya que, sin ellos no podría haber finalizado esta etapa de mi vida plasmada en este último proyecto de la carrera que he llevado a cabo.

En último lugar pero no menos importante quiero agradecer a mis amigos y compañeros a los que han terminado o aún siguen en la carrera, especial mención a la promoción de este año con los que he compartido tanto risas como lágrimas.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

Los procesos de intercambio de gases entre la tierra y la atmósfera determinan una parte importante del clima, por lo tanto es fundamental poder obtener datos fiables sobre su comportamiento y entender los mecanismos que lo determinan. Entre los diferentes factores que afectan al comportamiento de los gases se pueden encontrar, la temperatura, la humedad, la presión y el viento. Las concentraciones y flujos de gases fluctúan por la atmósfera debido al viento, es por esto que es importante realizar un estudio de este parámetro.

En este trabajo de final de grado se detalla el proceso de diseño, desarrollo y construcción de un dron como plataforma móvil para la instalación de un sensor de viento. Además, este sistema es capaz de acoplar otros sistemas de sensorización miniaturizados, de esta manera, el dron puede incluir sensores de viento, sensores de medición de gases, de temperatura, de presión y de humedad. La plataforma móvil construida para esta unificación es un cuadrotor, dron con 4 motores. Se ha realizado un estudio técnico de cada componente de forma individual para obtener un sistema optimizado en términos de capacidad de carga útil y tiempo de vuelo. Además, ha sido necesario diseñar y producir una serie de piezas con un programa de diseño asistido por ordenador 3D y una impresora 3D para así acoplar los sistemas de medición necesarios y convertir finalmente el dron en un sensor. Por otro lado para la gestión y obtención de los datos a de los sensores instalados, se ha tenido que diseñar y codificar un software específico en python. También se ha desarrollado un algoritmo que es capaz de obtener y analizar los parámetros de los motores convirtiendo de esta forma el dron en un sensor. Finalmente, el sensor de viento diseñado se ha implementado en base a una unidad de medición inercial, registrando inclinación, aceleración y orientación del sistema donde se ha instalado.

Después de construir e implementar los diferentes sistemas de administración y establecer la recopilación de datos, el sistema se probó en una prueba de campo y los resultados obtenidos muestran un buen funcionamiento. Por medio de la representación de los datos tomados, se observa y procesa la dirección y la velocidad del viento.

PALABRAS CLAVE

Cuadrotor, dron, gas/es, plataforma, protocolo, sensor, sensorización, sistema, unificación, viento, vuelo

ABSTRACT

The gas exchange processes between the earth and the atmosphere determine an important part of the climate. Therefore, it is essential to obtain reliable data on their behavior in order to understand the mechanisms that determine it. Among the different factors that affect the behavior of gases are temperature, humidity, pressure, and wind. Gas concentrations and fluxes vary in the atmosphere due to the wind, which is why it is important to determine this parameter.

This final degree project deals with the design, development and construction of a drone as a mobile platform for the installation of a wind sensor. Additionally the system is able to couple other miniaturized, digitized sensors. This way the drone system can include wind sensors, gas sensors, temperature, pressure and humidity sensors. The mobile platform for this assembling is a quadcopter, i.e. a drone with 4 motors. A technical study of each drone component has been carried to obtain an optimized system in terms of payload and flight time. On top of that it has been necessary to design and produce a series of pieces using a 3D computer assistance design program and a 3D printer. In order to obtain and to manage the data of the various sensors, it has been necessary to design and codify a specific software in python. Furthermore, an algorithm has been developed to read-out and analyze the motor's operational parameters to convert the drone itself into a wind sensor. Finally, a designed wind sensor has been implemented based on an inertial measurement unit, registering inclination, acceleration and orientation of the system where it is installed.

After building and implementing the different management systems and establishing data collection, the system has been tested in a field trial and the obtained results show good performance. By means of the representation of the taken data the direction and the speed that the wind can be is observed and processed further.

KEYWORDS

Drone, quadrotor, fly, gas, platform, protocol, sensor, sensorization, system, unification, wind

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Estado del arte	3
3	Sistema	7
3.1	Dron	7
3.1.1	Sistema de propulsión	7
3.1.2	Sistema de control	10
3.1.3	Mecánica	13
3.2	Implementación de sensores comerciales	14
3.3	Desarrollo de sensor de viento propio	17
4	Pruebas y resultados	19
4.1	Instrumentos de medición	19
4.2	Toma de medidas	20
4.3	Resultados	21
5	Conclusión	27
	Bibliografía	30
	Definiciones	31
	Acrónimos	33
	Apéndices	35
A	Estudio técnico de componentes para dron	37
B	Código diseñado para placa controladora	39
C	Código de registro del viento	41
D	Código de gráfica de viento brújula	43
E	Código de gráfica de viento mapa de calor	45
F	Código de gráfica de viento 2D	47
G	Código de gráfica de viento 3D	49

LISTAS

Lista de códigos

B.1	Main placa controladora TCP - parte 1	39
B.2	Main placa controladora TCP - parte 2	40
C.1	Código registro de viento - parte 1	41
C.2	Código registro de viento - parte 2	42
D.1	Código de scatterFit	43
E.1	Código de mapa de calor - parte 1	45
E.2	Código de mapa de calor - parte 2	46
F.1	Código de gráfica 2D - parte 1	47
F.2	Código de gráfica 2D - parte 2	48
G.1	Código de gráfica 3D - parte 1	49
G.2	Código de gráfica 3D - parte 2	50
G.3	Código de gráfica 3D - parte 3	51

Lista de ecuaciones

3.1	Expresión de cuaterniones	15
4.1a	Fórmula de conversión G	21
4.1b	Fórmula de conversión a N	21

Lista de figuras

1.1	Medición de viento con drones	1
2.1	Tipos de anemómetros	4
3.1	Dron básico	8
3.2	Diagrama placa controladora desarrollada	12
3.3	IMU con ejes de medición	15

3.4	Ejes yaw, pitch y roll	16
3.5	Antes y después de adaptacion raspberry-dron	18
4.1	Plano gimnasio IES Valle Inclán	20
4.2	Aceleraciones en 3 ejes	22
4.3	Puntos de medida	23
4.4	Mapa de calor con y sin zoom	23
4.5	Toma de medidas dividida en planos	24
4.6	Representación toma de puntos en gimnasio	24
4.7	Mapa de viento 3D	25
A.1	Estudio técnico de dron	37
B.1	Estructura programa	39

INTRODUCCIÓN

Los niveles de concentración de **Dióxido de Carbono (CO_2)** en la atmósfera han aumentado considerablemente en los últimos 20 años. Antes de la llegada de la industrialización, los niveles de CO_2 producidos y consumidos por la superficie terrestre y los océanos estaban compensados, sin embargo estos se han incrementado, llegando a unos niveles de presión de 410 **Parts Per Million (ppm)** respecto a los 280 ppm existentes antes de la industrialización [1] [2]. Los niveles de emisión de CO_2 por la tierra superan enormemente al nivel emitido por los humanos. Para poder estudiar estas emisiones de gases hay que tener en cuenta qué factores afectan a su comportamiento, siendo los más significantes la humedad, la temperatura, la presión y el viento entre otros. Este último, además, es el principal motivo de su desplazamiento.

Este TFG tiene como objetivo el desarrollo, diseño y utilización de una plataforma móvil que cuenta con un sistema de medición de viento y donde se pueda instalar un sistema de medición de gases miniaturizados. Favoreciendo, de esta forma, una toma rápida y fiable de datos.

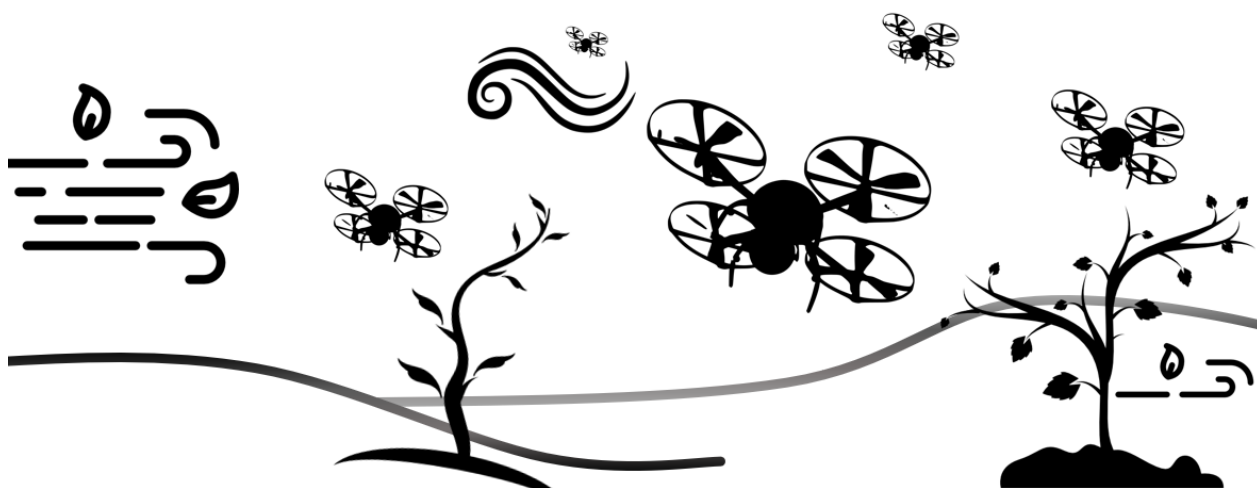


Figura 1.1: Medición de viento con drones. Sistema capaz de tomar datos en 3D y a tiempo real mediante la utilización de un dron como sensor de viento. (Iconos obtenidos de: svgsilh.com y www.shareicon.net)

Se ha realizado un estudio sobre los diferentes métodos de medición del viento y los posibles

drones para usarlo como plataforma móvil donde instalar este sistema de medición funcional.

Existen diferentes métodos para medir el viento, el más común es la veleta potenciométrica, cuyo anemómetro puede ser esférico, de hilo térmico, ultrasónico o de tipo láser doppler entre otros. Por otro lado existen sensores **Inercial Measure Unity (IMU)** . Que, mediante el desarrollo de un software específico para el tratamiento de datos como: orientación, inclinación y aceleración, obtiene la velocidad y dirección del viento. Como plataforma móvil se ha estudiado la utilización de un dron teniendo en cuenta los dos grandes grupos existentes, ala fija y ala rotatoria. Los drones con ala fija presentan una mayor autonomía frente a los de ala rotatoria que por otro lado cuentan con mayor versatilidad.

El objetivo de este trabajo es la creación de un cuadrocoptero, dron con ala rotatoria, como plataforma móvil donde instalar un sistema de medición de viento. La aplicación de uso se muestra en la figura 1.1. Se ha decidido construir un dron por partes realizando un estudio técnico previo, indicado en el apéndice A, e instalar un sistema de viento aplicando una IMU para su medición. Para poder unificar los dos componentes, se han tenido que crear diferentes piezas 3D diseñadas en un programa **Computer Assisted Design (CAD)** , permitiendo ,de esta forma, instalar cualquier otro sistema de sensorización miniaturizado en caso de ser necesario.

Este trabajo está organizado en diferentes capítulos. En primer lugar, en el capítulo 3, se explica el funcionamiento de los drones y sus componentes indispensables; continuando con la aplicación de los sensores comerciales actuales para la medición del viento y finalizando con el desarrollo de un sensor de viento propio unido a un dron. Se ha creado, por tanto, un sistema de medición de viento portátil. En el capítulo 4 se muestran las diferentes pruebas realizadas en función de su escenario. Se puede observar el comportamiento del dron y de sus mediciones representándolos en unas gráficas como: un mapa de calor y un mapa de viento 2D y 3D. En el capítulo 5 se resume la evolución de este trabajo sobre la utilización de drones como plataforma para un sistema de medición de viento como unidad básica del estudio de gases. En los anexos quedan reflejados el estudio técnico del dron desarrollado, el código diseñado e implementado para la toma y conversión de datos, y el algoritmo de gestión de estabilización.

ESTADO DEL ARTE

Este trabajo consiste en la elaboración de una plataforma móvil sobre la que instalar un sistema de medición de viento y sobre la que se puedan unificar otros sistemas de sensorización necesarios para el estudio de la atmósfera.

Para llevar a cabo un estudio satisfactorio sobre el intercambio de gases entre la tierra y la atmósfera, se tiene que tener en cuenta como se mueven o dispersan, por conducción o por difusión respectivamente. El método de difusión consiste en la mezcla gradual de dos gases en un solo entorno, principalmente el gas con mayor presión es el que se disuelve en el segundo, equilibrando de esta forma la presión de ambos gases; por otro lado tenemos el método de conducción de gases que consiste en aplicar una fuerza de desplazamiento mediante otro gas, vease como ejemplo el accionamiento de un spray a presión. Basándose en este último método, se debería realizar un estudio del viento en paralelo con el estudio de los gases para conocer de esta forma de dónde vienen y adónde van.

Hay muchos estudios sobre el análisis del viento y formas de medirlo, para medir el viento contamos con dos componentes básicos: velocidad y dirección; la dirección se mide mediante el uso de una veleta [3] [4], ésta es una superficie plana colocada en un eje, distribuyendo de forma equitativa su peso y permitiendo que gire libremente, la superficie plana no es igual en la parte delantera y trasera, siendo esta última de mayor tamaño y provocando que la parte pequeña o delantera indique hacia la dirección del viento, por otro lado, la velocidad se mide con un anemómetro [4], podemos encontrar diferentes tipos de anemómetros como: estándar o de copas, filamento caliente, empuje, compresión o tubo de Pitot, multisondas, láser, esférico y ultrasónico.

Un anemómetro estándar o de copas [5], ilustrado en la figura 2.1 (a), precisa de una calibración previa para obtener unos datos fiables, su rotación se va registrando mediante un contador y mediante una conversión se obtiene la velocidad del viento por tantas vueltas dadas; por otro lado el anemómetro de filamento caliente [6] [7], ilustrado en la figura 2.1 (g), funciona mediante la elevación de la temperatura de un hilo de platino o níquel. El movimiento del aire o viento produce que dicho hilo reduzca su temperatura variando a su vez la corriente que pasa por él, de esta forma obtenemos de forma proporcional la velocidad del viento. El anemómetro de empuje [8], ilustrado en la figura 2.1 (h), es muy poco

preciso, su funcionamiento se limita a empujar un cubo hueco colgado a forma de péndulo, se mide la velocidad del viento en función de su suspensión respecto a su estado de reposo. A continuación existe el anemómetro de compresión o tubo de Pitot [9] [8], ilustrado en la figura 2.1 (d), está formado por 2 tubos, uno de ellos con un orificio frontal y el segundo con un orificio lateral, la diferencia de presión medida entre ambos tubos indica la velocidad del viento. El anemómetro multisondas [10] [11], ilustrado en la figura 2.1 (b), utiliza el mismo principio que el anemómetro de compresión pero contando con 5 orificios y extendiendo el sistema de medición de viento a 3 dimensiones, este sistema es utilizado para aeromodelos como el UAV SUMO. El anemómetro esférico [12], ilustrado en la figura 2.1 (c), utiliza una sistema con una esfera para incidir con un láser, la desviación que sufre el láser indica de forma proporcional la velocidad del viento. El anemómetro láser doppler [13] [14] [15] [16], ilustrado en la figura 2.1 (f), consta de dos haces de luz que inciden sobre una lente reflejante creando de esta forma una franja de medida conocida, cuando una partícula pasa por esta franja emitirá pulsos de luz, por otro lado un fotodiodo es capaz de captar dichos pulsos obteniendo de esta forma la velocidad de dicha partícula. Por último cabe mencionar el sensor ultrasónico [17] [4], ilustrado en la figura 2.1 (e), este último tipo de anemómetro requiere de menos mantenimiento ya que no tiene piezas en movimiento, no obstante tiene un gran consumo eléctrico para su funcionamiento. Éste mide el tiempo requerido por el sonido para atravesar un campo conocido 10-30cm, estos anemómetros son muy precisos pero presentan problemas a la hora de medir el viento con lluvia.

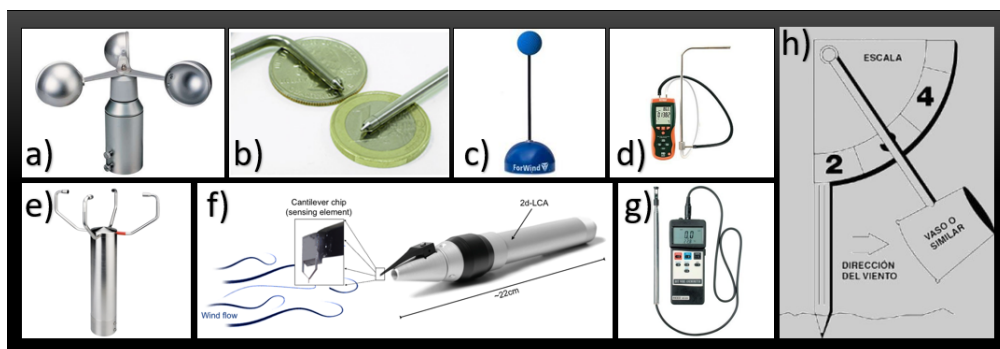


Figura 2.1: Tipos de anemómetros. Ordenados según figura: estándar o de copas, multisondas, esférico, filamento caliente, ultrasónico, láser doppler, compresión o tubo de Pitot y empuje

A todos estos tipos de anemómetros se pueden añadir los sensores como las IMU, unidad de medición inercial. Estos sensores registran la aceleración, la inclinación y la orientación del sistema donde estén instalados, mediante el desarrollo de un software específico, este sensor es capaz de aportar la fuerza del viento y su dirección, en función de la fuerza que se aplique al sistema y su orientación respectivamente. La ventaja de la utilización de estos sensores se encuentra en su precisión y su tamaño, pudiéndolo instalar en sistemas miniaturizados.

Por otro lado, la plataforma donde se pretende unificar todo el sistema de sensorización es un cuadrotor o dron de 4 motores, estas máquinas se pueden definir como UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o vehículo aéreo no tripulado. Su utilización hoy en día se ha incrementado por su versatilidad, facilidad,

seguridad y rapidez; facilidad de alcance donde el ser humano no puede llegar de forma natural, seguridad evitando la presencia del ser humano en un entorno peligroso y rapidez de respuesta en determinadas ocasiones. Debido al gran interés por los drones [18], se ha incrementado su diseño y construcción ofreciendo diferentes modelos y componentes. Se pueden diferenciar dos grandes grupos: drones de ala fija ¹ y de ala rotatoria ².

Los drones de ala fija destacan por su gran autonomía y su utilidad para el mapeo de superficies, no obstante no poseen de un tren de aterrizaje por lo que este tipo de dron precisa de una catapulta o persona que lo lance para poder despegar, se utiliza principalmente para labores de agricultura o fotogrametría [19]. Por otro lado existen los drones con ala rotatoria, estos drones son los más conocidos y más utilizados por su versatilidad al poder instalar complementos, ya sean cámaras o elementos de medición, y por su facilidad de pilotaje, sobre todo en el momento de despegar y aterrizar, ya que este modelo permite su despegue en vertical. Existen drones de ala rotatoria tricópteros, cuadrocópteros, hexacópteros u octacópteros, cada uno de ellos con 3, 4, 6 u 8 motores respectivamente. La autonomía de estos drones es muy limitada, teniendo 10 minutos a 1 hora aproximadamente frente a los drones de ala fija que fácilmente superan la hora de autonomía.

Hay numerosos estudios que emplean drones como sistema de medición, entre ellos se pueden encontrar los drones para medición de viento [17] [20] [21], cabe diferenciar varios modelos: SUMO, MMAV, MASC y Vario XLC; SUMO, Small Unmanned Meteorological Observer [22], es una plataforma diseñada por la Universidad de Berge, Noruega, que cuenta con un sistema de medición de temperatura, humedad y presión. Toma medidas del viento mediante el movimiento de sus hélices, junto con un sensor de GPS, mide la velocidad respecto de la tierra y determina a su vez la velocidad según el cabeceo del modelo, en caso de cabecear desde la parte frontal se ve acelerado y junto con la diferencia de velocidad respecto del suelo se obtiene la velocidad horizontal y su dirección. MMAV, Meteorological Mini Unmanned Vehicle [23], es un mini-dron diseñado por Mavionics GmbH en colaboración con la Universidad de Brunswick, Alemania. Este dron mide la velocidad del viento mediante el uso de un anemómetro de compresión con 5 orificios junto con un sistema de GPS y de medición inercial o IMU. MASC, Multi-purpose Automatic Sensor Carrier [24], es un dron de ala fija que opera automáticamente y toma medidas de flujo, calor y temperatura durante su vuelo a velocidad constante y con altura variable, cuenta con un sistema meteorológico similar al MMAV. Vario XLC [25], es una plataforma basada en un helicóptero a escala reducida que es capaz de levantar un peso máximo de 17 Kg, en este caso lleva instalado un anemómetro ultrasónico 3D.

Una vez descritos los sistemas de medición de viento y su posibilidad de instalación en una plataforma móvil como es un dron, se puede desarrollar un sistema acorde a las necesidades del proyecto miniaturizándose e instalándose en un cuadrotor.

¹ Dron de ala fija, se define como dron de ala fija aquel que cuenta con una o varias alas fijas en su parte superior, dotándole así de la capacidad de planear.

² Dron de ala rotatoria, se define como dron de ala rotatoria aquel que mediante el movimiento de una o varias alas sobre un eje fijo permite volar el objeto.

SISTEMA

Una vez realizado el estudio de los diferentes tipos de sensores de viento y drones utilizados como sensor de viento descritos en el capítulo 2, se explicará cómo realizar el estudio del viento y cómo diseñar una plataforma sobre la que se puedan unificar distintos sistemas de medición. Se tratarán los drones y sus componentes, posteriormente se describirán los sistemas de viento y se implementará mediante una IMU, finalizando con un sistema portátil de medición del viento.

Debido al gran tamaño y coste de los drones industriales, se ha decidido diseñar uno propio más pequeño y barato y posteriormente añadiéndole las modificaciones oportunas para incorporar el sistema de sensorización necesario. El dron estará diseñado para la incorporación de un microsistema de medición de gases junto con un sensor de viento.

3.1. Dron

Para la construcción del dron sobre el que se han realizado las pruebas, se ha efectuado una simulación técnica de un conjunto de componentes reflejado en el apéndice A, asimismo se ha seguido la lista de componentes, partiendo de los más restrictivos y completando con aquellos más flexibles dependiendo del sistema simulado.

A continuación se indicará en grupos los componentes elegidos, mostrados en la figura 3.1, con una breve descripción de su funcionamiento e importancia en el aeromodelo final.

3.1.1. Sistema de propulsión

Motores

Los motores son una parte fundamental del dron ya que han de proporcionar la potencia suficiente para hacer girar la hélices y, por consiguiente, hacer volar el dron.

Se han considerado varios parámetros como por ejemplo, la potencia, el consumo y la fuerza máxima de empuje. Los motores se clasifican según su velocidad indicándose en KV, revoluciones



Figura 3.1: Dron por partes. Se muestran los diferentes componentes del dron agrupados por sistemas indicados en diferentes colores: sistema de propulsión, motores, hélices y controladores de velocidad, encargados de ejercer la fuerza suficiente como para hacer volar al dron; sistema de control formado por placa controladora, distribuidora de potencia y receptor, encargada de gestionar la potencia y alimentación necesaria del aeromodelo, modificando la velocidad utilizando las señales recibidas desde el mando.

por minuto por voltio y su dirección de giro, que se distingue entre **ClockWise (CW)** y **Counter ClockWise (CCW)**. No es posible tener todos los motores con el mismo sentido de giro ya que se produciría un efecto de vórtice, es decir, haciendo girar el dron sobre si mismo y sin ningún control. Así mismo se pueden diferenciar dos clases de motores: con escobillas o sin ellas, este factor afecta a la forma de cambio de giro de los motores. Los motores sin escobillas llevan un sistema de carga de polos magnéticos para realizar el cambio de dirección, mientras que los motores con escobillas hacen circular la corriente por unas bobinas generando un campo magnético y en consecuencia atrayendo o repeliendo el rotor en un sentido u otro; cabe destacar que es necesario un mínimo de 3 bobinas para hacer girar el rotor puesto que, si se tuvieran sólo dos podría provocar que el motor se quedase en perpendicular cuando se produjese el cambio de giro.

Se han elegido unos motores sin escobillas por su rendimiento, menor desgaste y fiabilidad, como los ilustrados en la figura 3.1 (4).

Estos motores constan de 2300 **Kilo Voltage (KV)** y sin escobillas, contando así con 3 cables: alimentación, masa y potencia. La velocidad de los motores varía mediante la utilización de una señal PWM, modificando su ciclo de trabajo desde 1 milisegundo (ms) hasta 2 ms, estableciendo a 1'5 ms funcionaría a mitad de potencia y a 2 ms funcionaría al 100 %.

Un **Pulse width modulation** es la modulación de una señal digital provocando en sistemas con

menos velocidad de lectura la llegada de una señal analógica. Un PWM con una salida de 3,3 V y con un ciclo de trabajo del 50 % produciría en el sistema receptor una señal analógica de $3,3 \text{ V} / 50 = 0,66 \text{ V}$ de señal de entrada, reduciendo su potencia un 50 %.

Controlador de velocidad

El controlador de velocidad **Electronic Speed Controller (ESC)**, es un controlador esencial que determina la potencia suministrada al motor variando su velocidad. Es necesario instalar uno por cada motor controlándolos así de forma independiente. Por un lado cuenta con 2 ó 3 cables dependiendo de si es un controlador de velocidad para un motor con escobillas o sin ellas, y por otro lado dispone de 4 cables: dos cables de alimentación conectados a la placa de distribución de potencia y otros 2 que reciben la potencia que ha de suministrar al motor.

Los ESC se deben elegir en función de la batería que vayas a utilizar, teniendo en cuenta el número de celdas y su ratio de descarga continua. Los controladores de velocidad comprados, 3.1 (2), cuentan con una capacidad de descarga de 35 amperios indicando la potencia que pueden generar los motores.

Los ESC pueden recibir la señal PWM que indica la potencia que debe suministrar al motor, a partir del controlador de vuelo o directamente desde el receptor del mando. Es aconsejable recibirla desde el controlador de vuelo, ya que de esta forma se gestiona la estabilización del dron, favoreciendo un control mucho más fácil del aeromodelo [26].

Hélices

Las hélices son un componente menos crítico a la hora de elegirlas y montarlas sobre el dron, existen diferentes formatos con las siguientes características:

Tamaño: Pueden variar desde 2 a 19 pulgadas, el tamaño de las hélices se ve limitado por el tamaño de los brazos del chasis donde se monten. Hay que tener en cuenta que a mayor tamaño mayor superficie y por tanto más empuje. Hoy en día se utilizan con más frecuencia las hélices entre 4 y 6 pulgadas las cuales favorecen el funcionamiento de drones con motores rápidos como los utilizados en drones de carreras, no obstante también se utilizan las hélices con tamaño de 10 o más pulgadas para aeromodelos que no priorizan la velocidad, si no que necesitan mayor estabilidad y llevar cargas elevadas.

Número de aspas: Varía desde 2 a 6 aspas, el número de aspas afecta a la superficie de empuje, aumentando la fricción y por tanto la fuerza que ejerce para levantar el dron. En hélices con un tamaño pequeño de hasta 6 pulgadas, podemos encontrar hasta un máximo de 6 aspas, mientras que en hélices de mayor tamaño, 10 pulgadas o superior, no solemos superar las 2 aspas.

Forma: La forma es un punto crítico de este componente, tienen una forma de pala corvada

para conseguir el empuje del aire en el sentido contrario de giro del motor. La terminación del aspa también afecta al vuelo de un dron, se pueden diferenciar: acabadas en punta, Bullnose e Híbridas bullnose, determinando mayor o menor empuje y en consecuencia mayor o menor consumo.

En el dron diseñado se ha priorizado su tamaño, ya que como se ha explicado anteriormente el tamaño de las hélices afecta a la fuerza de empuje vertical del dron para poder levantar su carga, puesto que se cuenta con un dron con un peso de 660 gramos y con una carga añadida de 200 g máximo, se ha elegido unas hélices de 5 pulgadas con un total de 3 aspas, obteniendo así un punto óptimo entre empuje o fuerza máxima y duración de vuelo, como la hélice de la figura 3.1 (5).

3.1.2. Sistema de control

Placa distribuidora de potencia

Un punto crucial de los componentes electrónicos es su alimentación, para favorecer la durabilidad y estabilidad del circuito o circuitos electrónicos se debe aislar el circuito de potencia del circuito lógico mediante elementos como los que contiene la **Pluggable Database (PDB)** : diodos, resistencias y transistores los cuales evitan picos de tensión.

Esta placa, ilustrada en la figura 3.1 (6), está conectada a la batería mediante un conector, en este caso se cuenta con un conector XT60, el cual impide conectar cada polo con su opuesto debido a su forma, evitando así cortocircuitos y daños al sistema. Por otro lado, la PDB distribuye la tensión necesaria al resto de los componentes, entre los que se destacan:

ESC: Hasta un total de 6 controladores de velocidad, en este caso son 4 ESC que funcionan con baterías de 2 a 4 celdas y por tanto de 6 a 16 voltios.

Circuito 5V: Circuito de 5 voltios de tensión con un sistema de BEC para evitar picos y conseguir un circuito con alimentación continua y estable, con una corriente continua de 2 amperios y una corriente máxima de 2'5 amperios.

Circuito 12V: Circuito de 12 voltios de tensión, con el mismo funcionamiento que el circuito a 5 voltios, con una corriente continua de 500 mA y máxima de 0'8 amperios.

Controlador de vuelo

La placa controladora de vuelo es la unidad de procesamiento del dron encargada de gestionar la señales provenientes del receptor, leer los parámetros de los diferentes sistemas de estabilización y su posterior modificación para proporcionar la potencia adecuada a cada motor.

Placa comercial

La elección de la controladora de vuelo viene determinada sólomente por el protocolo de comunicación que utilice, aunque a día de hoy la mayoría de controladoras cuentan con software reprogramable que se ajusta a los diferentes sistemas de comunicación, como los más conocidos iBUS o sBUS.

En la controladora de vuelo, ilustrada en la figura 3.1 (7), se pueden conectar el sistema de comunicación, sistema de vídeo, controladores de velocidad de los motores, bocina de emergencia y la antena de comunicación de largo alcance.

Placa desarrollada

En este **Trabajo final de grado (TFG)** se ha reproducido el sistema de control del dron en una Raspberry Pi 3 B+ [27], con el fin de unificar todos los controles en un sólo punto y poder utilizar todas las señales entrantes y salientes para mediciones posteriores.

Para representar el sistema de la controladora de vuelo se ha partido del sistema de descifrado del protocolo de comunicación elegido, iBUS, este protocolo manda paquetes de información a través del puerto serie. La raspberry cuenta con dos pines de comunicación por puerto serie: Rx para recibir la información y Tx para transmitirla.

El paquete recibido tiene un tamaño total de 31 bytes, con un byte inicial estándar con contenido igual a 0x55, a continuación encontramos un total de 14 canales con 2 bytes por canal y un checksum al final con un tamaño de 1 byte. El paquete se transmite cada 7 ms con una tasa de baudios de 115200, es decir, un total de 115200 bits por segundo. Para desglosar el paquete recibido, enviado por el mando, se ha tenido que codificar un algoritmo en python donde se diferencia y se convierte cada uno de los bytes a decimal, obteniendo de esta forma un valor de cada canal entre 1000 y 2000, siendo 1000 el valor mínimo y 2000 el máximo valor posible.

Para poder producir el PWM correcto y enviárselo a los controladores de velocidad, se ha escogido el chip PCA9685 que convierte de digital a PWM y tiene hasta un máximo de 8 canales. Ha sido necesario dicho chip ya que la raspberry no cuenta con el número suficiente de canales para controlar los 4 motores. La Raspberry cuenta con 3 sistemas de comunicación: I2C ¹, SPI ² y puerto ³, para la configuración del chip PCA9685 se ha realizado mediante comunicación por I2C y su respectiva librería de adafruit obtenida por github [29].

¹ I2C, es un protocolo de comunicación que cuenta con 2 cables: uno de ellos (SCL) indica los pulsos de reloj y el otro (SDA) se encarga de transportar los datos. Al contar con un único cable de datos y ser capaz de comunicar dos o más dispositivo es necesario un maestro que se encargue de mediar la comunicación.

² SPI, es un protocolo de comunicación usado habitualmente para la transferencia de datos entre equipos electrónicos. Formado por un total de 4 conexiones: CLK o reloj de sincronización, envío de datos, recepción de datos y un Enable que permite recibir datos en caso de estar activo o negarlos en caso de estar inactivo, de esta forma se puede utilizar el SPI para comunicarse con varios sensores utilizando multiplexación mediante el pin de enable [28].

³ Puerto serie, es un protocolo de comunicación digital que aplica la serialización, conversión de los datos a nivel de byte a una serie de pulsos para que puedan ser enviados y recibidos, existen diferentes tipos: UART usado por la Raspberry, USART, EUART.

Se ha tenido que indicar desde la raspberry la frecuencia de salida de los PWM, 2000 Hz , y el ciclo de trabajo previamente obtenido por nuestro rango de entrada entre 1000 y 2000.

Funcionamiento de algoritmo codificado

La Raspberry recibe el paquete de bytes y lo transforma mediante el algoritmo diseñado y codificado en valores entre 1000 y 2000 por cada canal. Por otro lado se usa la librería de Adafruit para el chip PCA9685, pasándole el rango calculado y configurando el PWM a generar a 2KHz de frecuencia.

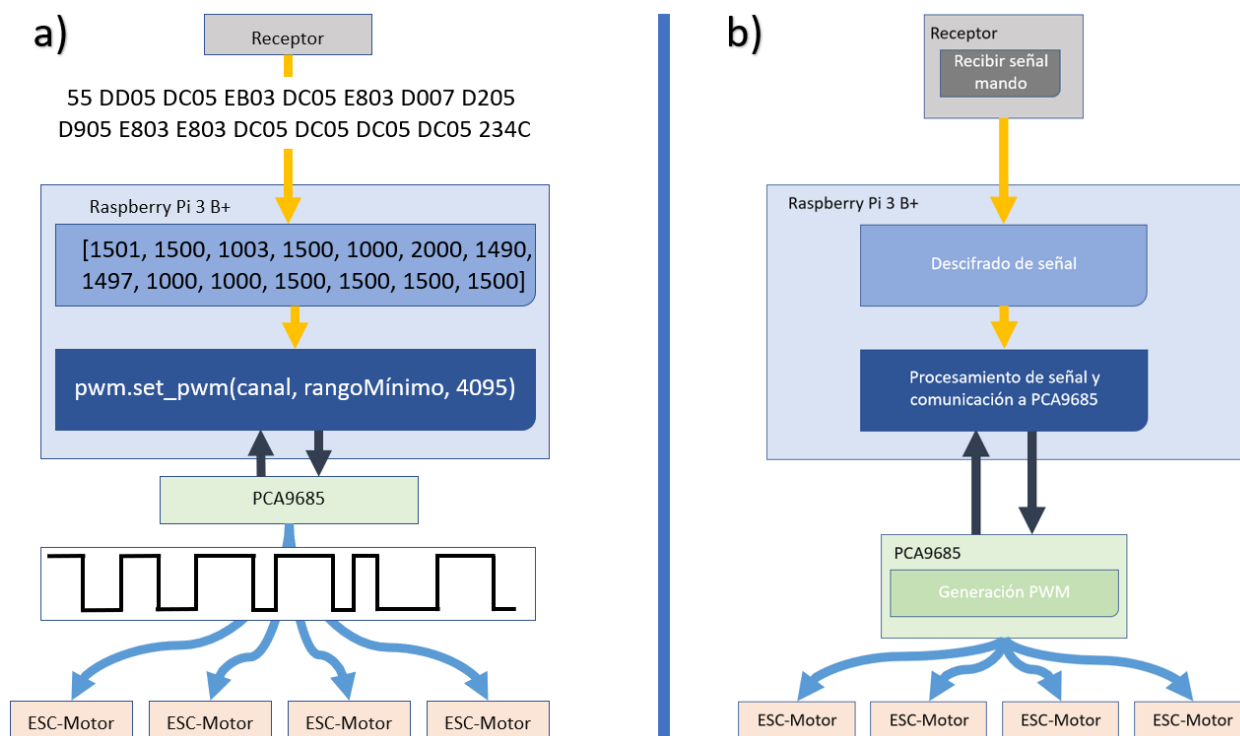


Figura 3.2: Diagrama de placa controladora a alto y bajo nivel. El receptor recibe la señal del mando, que se transmite a la raspberry y que realiza la conversión necesaria para general el PWM correcto utilizando el chip PCA9685 a los 4 canales necesarios, uno para cada esc-motor.

En la figura 3.2 se pueden observar dos imágenes, a y b, en la imagen b se muestra a alto nivel como funciona el sistema de gestión de la placa controladora diseñada, mientras que en la imagen a se muestra a bajo nivel el proceso y conversión de los datos desde el receptor hasta los PWM mandados a los motores.

Una vez conseguida la señal de salida PWM en función de la entrada del mando, se modifica la señal a partir de los datos obtenidos por el sensor MPU9250, el cual nos indica la inclinación y fuerzas que se ejercen sobre el dron; de esta forma se mandama la potencia adecuada a cada motor para conseguir un vuelo estable y horizontal. Posteriormente se realizó la estructura del programa para la obtención de la potencia de los motores para poder medir el viento a partir de ellos, convirtiendo de esta forma el dron en un propio sensor de viento, no obstante, debido a las dificultades de probar el

sistema de estabilización y su ajuste, se decidió trabajar con la placa comercial.

Sistema de comunicación

El sistema de comunicación está compuesto por dos componentes, receptor y transmisor, 3.1 (1) y 3.1 (3), y se pueden elegir diferentes tipos teniendo en cuenta su protocolo de comunicación.

El sistema de comunicación tiene diferentes protocolos para transmitir la información, utiliza un protocolo entre emisor y receptor y otro distinto entre receptor y unidad de procesamiento o controladora de vuelo [30].

El protocolo de comunicación entre emisor y receptor tiene que ser siempre igual, es por eso que la mayoría de mandos, emisores, incluyen un receptor estándar. En este caso se ha utilizado un pack FlySky emisor-receptor.

En el caso del protocolo entre el receptor y la unidad de procesamiento podemos encontrar señales PWM, PPM, SBUS, iBus entre otras. La diferencia entre estos protocolos es la forma de estructurar el paquete de datos o la conexión que hay que realizar a nivel de hardware. Por su simplicidad y comodidad se ha utilizado el protocolo iBus que cuenta con un paquete de transmisión de 31 bytes.

3.1.3. Mecánica

Chasis

El chasis de un dron es la estructura donde se van a montar todos los componentes anteriormente descritos, contamos con diferentes características al comprar o fabricar el nuestro:

Número y longitud de brazos El número de brazos determina el número de motores que podemos instalar en nuestro aeromodelo, hay chasis desde 4 hasta 8 brazos, siempre números pares. La longitud de los brazos nos ayuda a instalar unas hélices de mayor tamaño.

Distribución La distribución de los brazos no es una característica muy importante sino más bien estética. En chasis con 4 brazos podemos encontrar distribuciones en H o en X.

Material El material del chasis dispone al dron de resistencia ante roturas en caso de accidente, rigidez a la hora de ejercer fuerza sobre él y peso según la composición del material utilizado. Se ha utilizado un chasis de fibra de carbono por su equilibrio entre las características mencionadas destacando su leve peso.

El dron elegido cuenta con un chasis de 4 brazos en disposición X y con un tamaño entre ejes de 220 milímetros permitiéndome instalar unas hélices de hasta 5 pulgadas, este chasis de fibra de carbono pesa un total 127 gramos.

Batería

La batería para cualquier radiocontrol es indispensable ya que es el elemento que proporciona la electricidad para que todo funcione, por eso es fundamental calcular el gasto de nuestro sistema y escoger una batería que nos proporcione una durabilidad media elevada. Se distinguen diferentes características de las baterías como:

Composición: Existen diferentes tipos de baterías en función de su composición. Hay diferentes tipos como **Níquel Cadmio**, **Ion Litio**, **Polímero de Ion Litio**.

Capacidad: A más capacidad de carga más duración de vuelo tiene pero a su vez mas peso, perjudicando este al tiempo de vuelo.

Número de celdas: A mayor número de celdas generalmente la batería cuenta con más capacidad y más potencia al estar conectadas en serie.

Tasa de descarga: La tasa de descarga indica la tasa máxima de descarga que ofrece la batería, a mayor tasa más potencia se puede transmitir a los motores y por tanto mayor empuje.

Para el dron utilizado, se ha escogido una batería de 3 celdas de Polímero de Ion Litio (LiPo) con una capacidad de 1500 miliamperios (mAh) y con un peso de 107 gramos (g), 3.1 (8).

La configuración de esta batería nos ayuda a tener una capacidad óptima en relación con el peso. Está compuesta por polímero de Ion Litio proporcionando una durabilidad de 300 a 500 horas (h) de uso sin necesidad de mantenimiento por parte del usuario. Dispone de 3 celdas en serie consiguiendo una mayor capacidad de almacenamiento y mayor tensión de salida para alimentar el dron.

3.2. Implementación de sensores comerciales

Actualmente los sensores de viento habituales cuentan con dos elementos básicos: el anemómetro y la veleta, el primero se encarga de medir la velocidad del viento y un tipo de anemómetro, hilo caliente, consiste en un hilo de platino que se calienta eléctricamente; la acción del viento produce la disminución de su temperatura variando así su resistencia y provocando que la corriente que atraviesa dicho hilo se altere y nos indique de forma proporcional la velocidad del viento [13], y el segundo elemento básico, la veleta, indica la dirección del viento; esta es una superficie plana colocada en un eje, distribuyendo de forma equitativa su peso y permitiendo que gire libremente, la superficie plana no es igual en la parte delantera y trasera, siendo esta última de mayor tamaño y provocando que la parte pequeña o delantera indique hacia la dirección del viento [3]. Estos dos elementos pueden encontrarse montados de forma separada o conjuntamente denominándose veleta potenciométrica [4]. Este sistema de medición es muy preciso pero tiene un coste elevado. Necesita de una instalación en una localización fija, que además de precisar una altura mínima debe estar libre de obstáculos para

poder realizar las medidas correctamente.

Actualmente existen sensores que se utilizan en la estabilización de un avión, el registro del movimiento de un coche o incluso en aplicaciones móviles.

En esta sección se explicará como utilizar un sensor de aceleración, giroscopio y magnetómetro.

Para realizar este experimento se ha utilizado el sensor MPU9250⁴, ilustrado en la figura 3.3(a), que a su vez tiene integrado otros dos sensores el MPU6050, que se encarga de la aceleración y el giroscopio, y el AK8963 que gestiona el magnetómetro, componiendo de esta forma un microchip que mide la alteración de su posición en función de 3 ejes.

Los datos obtenidos por el sensor MPU6050⁵ son datos sin tratar, que indican la aceleración en el instante de la medición y la inclinación respecto de la anterior medida tomada, mientras que el sensor AK8963⁶ indica la orientación.

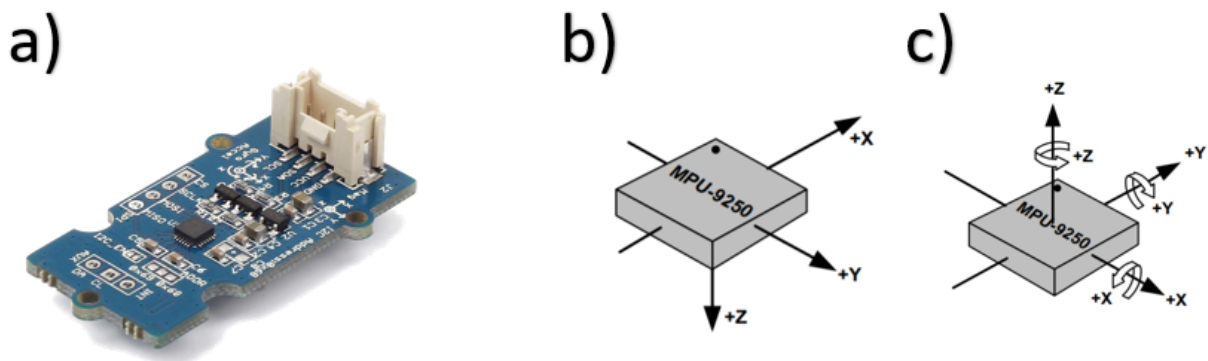


Figura 3.3: Sensor MPU9250 con ejes de funcionamiento. Figura 3.3 (a) muestra el sensor físico mientras que la figura 3.3 (b) muestra la diferencia entre los ejes de medición conjuntamente del giroscopio y acelerómetro y del magnetómetro, figura (c), muestra unos ejes distintos.

Para poder saber claramente en que posición se encuentra el microchip con respecto a una superficie plana y no a su inclinación en relación a la anterior medida, se ha implementado el algoritmo de madgwick [31] que utiliza cuaterniones para indicar la inclinación absoluta en función de los ejes de la tierra.

Los cuaterniones [32] son un conjunto de cuatro componentes complejos que sirven para la teoría de números, rotaciones en el espacio y para diseño de gráficos; en este caso se utilizarán para las rotaciones en el espacio. Los cuaterniones se pueden expresar como en la ecuación 3.1.

$$\mathbb{H} = \{a + bi + cj + dk : a, b, c, d \in \mathbb{R}\} \subset \mathbb{C}^2 \quad (3.1)$$

⁴Datasheet: InvenSense, “MPU9250 Product Specification Revision 1.1,” 2016. (Fecha de acceso: 2019-06-12)

⁵Datasheet: InvenSense, “MPU6050 Product Specification Revision 3.3,” 2012. (Fecha de acceso: 2019-06-12)

⁶Datasheet: InvenSense, “MPU9250-AK8963 Product Specification Revision 1.1,” 2016. (Fecha de acceso: 2019-06-12)

Fórmula de cuaternion 3.1 de 4 dimensiones. a, b, c, d son las componentes reales del cuaternion; i, j, k son los componentes que multiplican cada una de las componentes reales.

Mediante el algoritmo de madgwick, se convierten los datos obtenidos desde el giroscopio, acelerómetro y magnetómetro en un componente de 3 elementos, yaw, pitch y roll, proceso ilustrado en la figura 3.4. Cada uno de estos elementos nos indica su rotación respecto a un eje del aeromodelo.

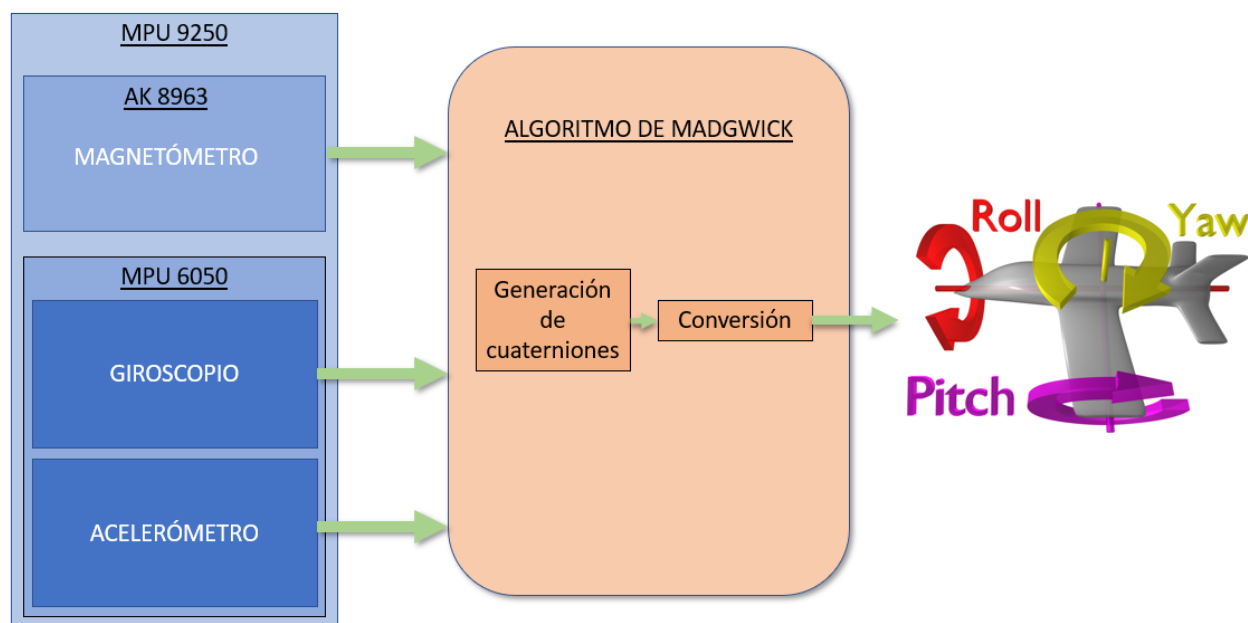


Figura 3.4: Se recogen los datos del sensor MPU9250, magnetómetro, giroscopio y acelerómetro y los tratamos mediante el algoritmo de madgwick. Convierte las medidas y los convierte en los ejes de giro, yaw, pitch y roll.

Mediante la utilización de estas rotaciones en función de sus ejes se puede determinar como hay que actuar en los motores para que se mantenga volando de forma estable y horizontal.

En este punto se cuenta con la inclinación del sensor en base a los ejes de la tierra, su aceleración y su dirección en grados; con este conjunto de datos podemos calcular la variación de su posición en función de un punto inicial.

Para calcular el viento se ha planteado un sistema que toma como eje el centro de la tierra; de esta forma si el sensor está orientado al norte y se inclina hacia delante se obtiene una dirección de viento de sur a norte, y en caso de inclinarse hacia delante y a izquierda, se obtiene un viento de sur-este. La fuerza del viento viene indicado directamente por los datos obtenidos del acelerómetro en función de los tres ejes.

3.3. Desarrollo de sensor de viento propio

En esta sección se describirá la unificación el sensor de viento con el dron y qué es necesario para que todo funcione como un único sistema. Para poder llevar a cabo esta unión se ha de tener en cuenta el peso del sistema de viento, la Raspberry y el sistema de sensorización, junto con el peso del dron para hacer una estimación media de la duración de vuelo.

A continuación se explicará los tres pasos que he llevado a cabo: en primer lugar desde donde empiezo, seguido de como junto todos los sistemas y finalizando con como funciona todo el conjunto.

Para poder diseñar un sensor de viento que funcione con un dron primero hay que estudiar que sistema de estabilización usa el dron, se puede diferenciar entre dos sistemas principales. Un primer sistema realiza una estabilización del dron que registra la desviación de su posición desde un punto y lo corrige para mantenerse siempre en ese mismo punto. El segundo sistema de estabilización intenta que el dron no se caiga, modificando la potencia de los motores acorde con la fuerza que se ejerce sobre el, de esta forma consigue que el dron esté lo más horizontal posible.

En este caso, se usa un placa comercial que funciona como el segundo sistema descrito y por tanto se usa un giroscopio para poder medir las diferentes inclinaciones y fuerzas que sufre el dron. En el caso de utilizar el primer sistema se debería usar una medición de la potencia suministrada a los motores para ver que potencia se esta ejerciendo para contrarrestar la fuerza que se ejerce sobre él.

Por otro lado se cuenta con un chasis base de un dron de 220 mm entre ejes donde es necesario montar un soporte para instalar nuestro ordenador o unidad de procesamiento, en este caso una Raspberry Pi 3 B+, y nuestro sistema de sensorización.

Para poder unir los dos sistemas y realizar medidas en vuelo, se ha tenido que aprender a utilizar un software específico para diseñar una serie de piezas 3D y así poder acoplar la sensorización al dron.

Entre las piezas de impresión se cuenta con:

Soporte Raspberry Pi Para el soporte de la Raspberry Pi 3 B+, se ha diseñado una pieza que se acopla en la parte inferior del chasis del dron.

Zona de sensorización: Una vez instalado el soporte de la Raspberry, se ha diseñado una tapa intermedia donde se puede instalar el sistema de sensorización necesario. Esta zona esta diseñada con suficiente espacio para poder instalar además del sensor base diseñado, sensor de viento, otros sensores como por ejemplo un sensor de gas con sus componentes necesarios.

Al diseñar las piezas de forma independiente se puede modificar, en caso de necesidad, la tapa del chasis del dron y crear otra forma o ampliar el espacio respetando el acoplamiento a la tapa intermedia.

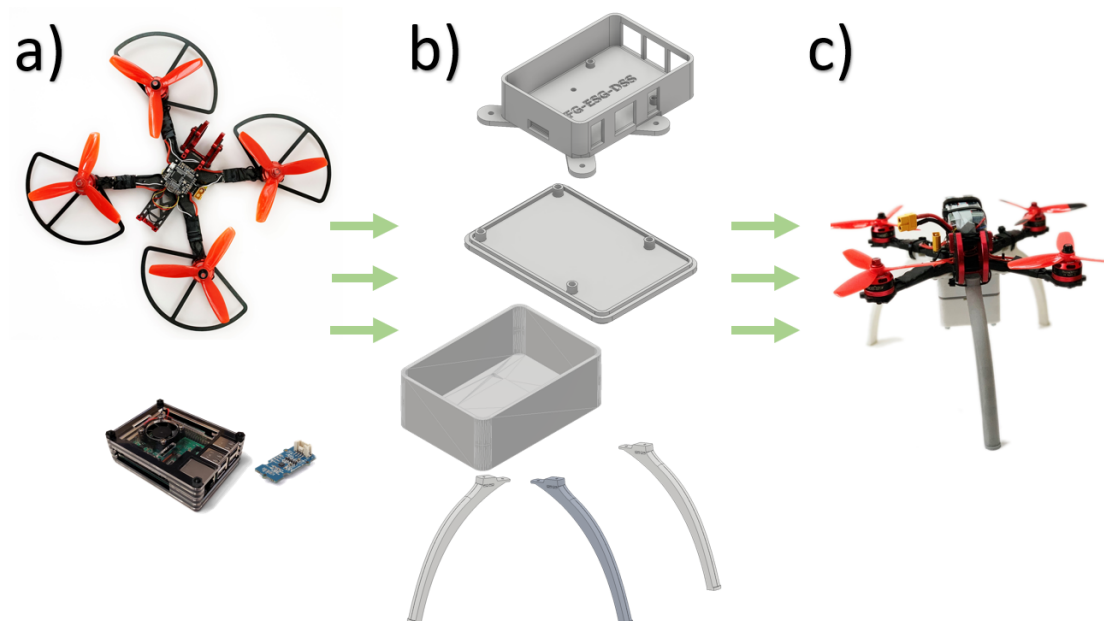


Figura 3.5: En la subfigura a) se puede observar los sistemas de forma independiente a unificar. En la subfigura b) se presentan las piezas diseñadas e impresas en 3D para poder acoplar sistemas de medición al dron. En la subfigura c) se observa el sistema de medición instalado en el dron construido.

Elementos de aterrizaje Una vez instaladas las anteriores piezas, se ha prolongado el dron por su parte inferior un total de 6 cm y por ello es necesario instalar un tren de aterrizaje.

Para el tren de aterrizaje se ha probado a instalar un total de 4 patas, una por cada motor. Por problemas de estabilidad se eliminó una de ellas, distribuyendo 2 de las patas en los motores traseros y la tercera en la parte delantera-media del dron. Con 3 patas se asegura aterrizar el dron correctamente en una superficie plana.

Una vez se ha unido todo como un solo sistema, dron y sensorización junto con la raspberry, se procederá a realizar las mediciones con el dron volando.

Para tomar las medidas correctamente con el dron se tiene que mantener volando, los datos se obtienen a partir de la variación de su posición en cuanto a inclinación que sufre por fuerzas como el viento. Para la realización de esta prueba se cuenta con los cálculos de vuelo previamente hechos sobre un dron con un peso máximo de 900 gramos y con una batería de 3 celdas y 1500 mAh de capacidad. El único manejo que se debe hacer con el dron en el momento de medir es modificar su altura ya que no tiene un sistema automático de mantenimiento de distancia respecto del suelo.

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Instrumentos de medición

Esta sección tratará los instrumentos de medición con los que realizarán las pruebas, tanto los diseñados a nivel de hardware como los elementos software de toma de datos. A nivel físico se cuenta con el dron construido y su equipo: batería, mando-receptor, hélices, motor, controlador de velocidad, PDB y chasis; cabe nombrar el escenario donde se han realizado las pruebas. A nivel de software se ha contado con programas diseñados y codificados en python 3 por su facilidad a la hora de codificar y su versatilidad en cuanto a incluir librerías ya implementadas por otros usuarios. Se ha tenido que desarrollar dos programas: un primero encargado de la toma de medidas como las descritas en la sección 3.2 y un segundo programa que usa estas medidas y las plasma en gráficas adecuadas para su interpretación.

Para usar el dron construido se dispone con 3 baterías de 1500 mAh que proporcionan una media de 15 minutos de vuelo interrumpido, con vuelos de aproximadamente 10 segundos por cada medida. Las baterías sirven para dar potencia al dron descrito en el apartado 3.3. Para maniobrar el dron se utiliza un mando de un alcance teórico de 500 metros como el ilustrado en la figura 3.1(1).

La utilización de drones se ha visto aumentada en los últimos años, desde drones pequeños, de menos de 2 Kg, hasta drones de grandes dimensiones que pueden llegar a pesar más de 25 kg. Son aparatos que pueden ser utilizados tanto para uso recreativo como para transporte de paquetes o incluso personas. Dependiendo de su práctica y sus características, peso y tamaño, es necesario tener una licencia para su uso. Se puede distinguir diferentes tipos de licencia como por ejemplo: licencias para drones de desde menos de 2 kilogramos (kg) de peso hasta más de 25, licencias para su uso a corta o larga distancia o licencias en función del escenario donde se pretenda volar el aeromodelo.

Para el dron que se ha desarrollado no es necesario un permiso especial puesto que es un objeto de menos de 2 kg de peso, no obstante dado que se puede clasificar como un dron para su uso industrial se podría necesitar con una licencia especial para poder realizar la toma de medidas.

Esta es la razón por la que la mayoría de las tomas de medidas se han realizado en un sitio cerrado,

utilizando las instalaciones del Instituto de Educación Secundaria (IES) Valle Inclán en Torrejón de Ardoz. Las tomas de medidas se han realizado en horario no lectivo en un sitio controlado por varios ayudantes.

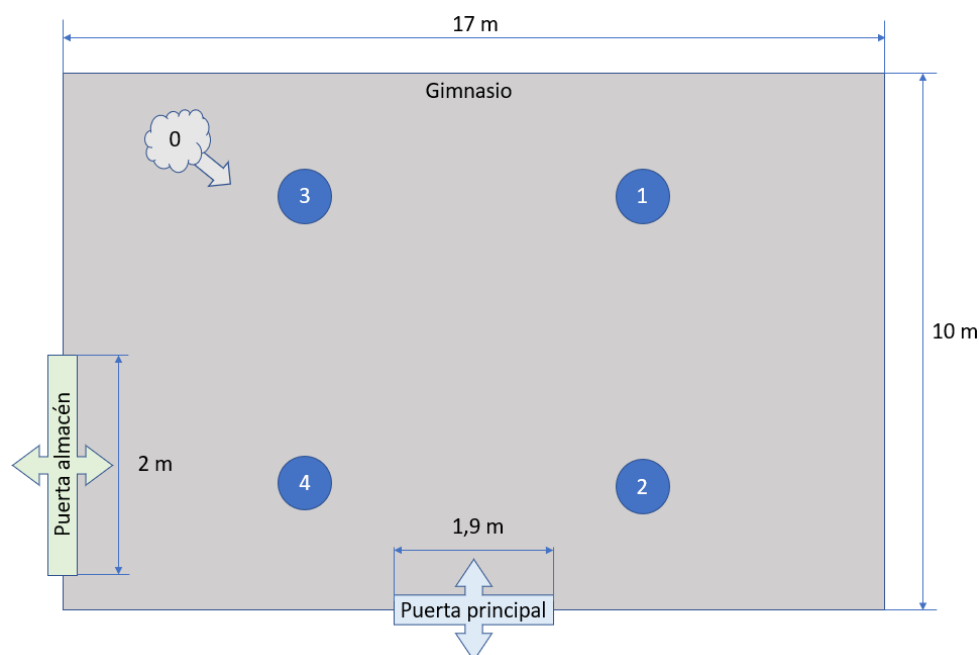


Figura 4.1: Plano del gimnasio del IES Valle Inclán con las entradas/salidas que afectan a la toma de medidas. Puntos 1-4 representan los puntos donde se ha realizado la toma de medidas. Punto 0 representa el foco del viento.

El escenario principal utilizado ha sido el gimnasio del centro, que cuenta con un espacio de 10 m x 17 m x 4'6 m, dispone de varias puertas de las que sólo hay que tener en cuenta aquellas que dan a la calle, ya que son las que podrían alterar las medidas tomadas por la circulación del aire. La puerta principal da paso al centro de la sala, la puerta del almacén del material se encuentra en la esquina izquierda del gimnasio.

Un segundo escenario donde se han realizado las medidas es en el Monumento de los Guardias Forestales localizado en el municipio de Rascafría, Madrid, dirección Puerto de Cotos. En esta localización se probó un vuelo al aire libre y de mayor altura con viento moderado para comprobar cómo se comporta el dron en situaciones más reales.

4.2. Toma de medidas

Se han realizado las tomas de medidas de formas distintas: la primera como una toma única de datos y la segunda como la toma de conjunto de puntos como el descrito en la figura 4.1.

En ambas tomas de medidas se ha alterado la altura del dron para poder realizar una comparación

del viento, a una altura de 0,5 metros (m) del suelo y a 2,5 metros aproximadamente. Cabe indicar que para la toma del conjunto de datos, se ha simulado una matriz en el gimnasio y modificando la posición del dron para cada una de las tomas de datos, cambiando tanto su posición en el eje X, Y como Z.

Para las tomas de medidas se ha simulado una corriente de aire con un ventilador; no obstante al ser una circulación de aire tan leve se tuvo que incorporar en la generación del aire, un movimiento mecánico manual de una colchoneta a forma de abanico.

Una vez preparado el escenario, con y sin viento, se procedió a la colocación del dron y a la toma de datos. En una primera prueba se realizaron tomas de datos individuales a varias alturas para familiarizarse con el comportamiento del dron con y sin viento. En las siguientes pruebas se realizaron algunas tomas individuales y un total de 2 pruebas de matrices, con un conjunto de 8 puntos, 4 en un plano y 4 en otro plano. El primer plano se definió a una altura aproximada de 0'50 metros (m) del suelo, mientras que el segundo se situó a una altura aproximada de 2'5 m de altura.

La forma de tomar los datos con el sensor de viento y el dron, fue iniciada y terminada en vuelo.

4.3. Resultados

Cabe señalar que las medidas obtenidas y representadas se encuentran en función de la unidad de fuerza G, es decir, la gravedad. Se ha mantenido así por mayor claridad y unificación con los sistemas de aceleración estudiados; no obstante, se indica en la ecuación 4.1a la conversión necesaria para poder representarlo en el Sistema Internacional (SI) de unidades.

Las pruebas realizadas se han hecho con el dron volando e iniciando el software de recogida de datos en vuelo; los datos obtenidos mediante la serie de pruebas descritas en el apartado 4.2 son los representados en las siguientes imágenes: 4.2, 4.3, 4.4(a), 4.4(b), 4.5(a), 4.5(b) y 4.7.

$$1 G = 9,807 m s^{-2} \quad (4.1a)$$

$$1 N = 1 Kg m s^{-2} \quad (4.1b)$$

Para convertir a Newton (N) de fuerza, se debe multiplicar usando la fórmula 4.1b por el peso del dron, indicado en la sección 3.1.

En la figura 4.2 se pueden observar 3 gráficas con una serie de puntos negros, la resolución del acelerómetro, y una línea roja describiendo una pseudofunción del comportamiento de la gráfica. Cada una de las gráficas representa un eje distinto de acción, siendo la primera el eje X, la segunda el eje Y y la última el eje Z. En cada una de las gráficas esta dibujada una recta roja, la cual representa el punto de reposo o base del acelerómetro. Tanto en el eje X como en el Y el punto de reposo se encuentra una recta con función $y=0$, pero en el eje Z una función $y=1$. Este último eje, siempre ejerce 1 G de

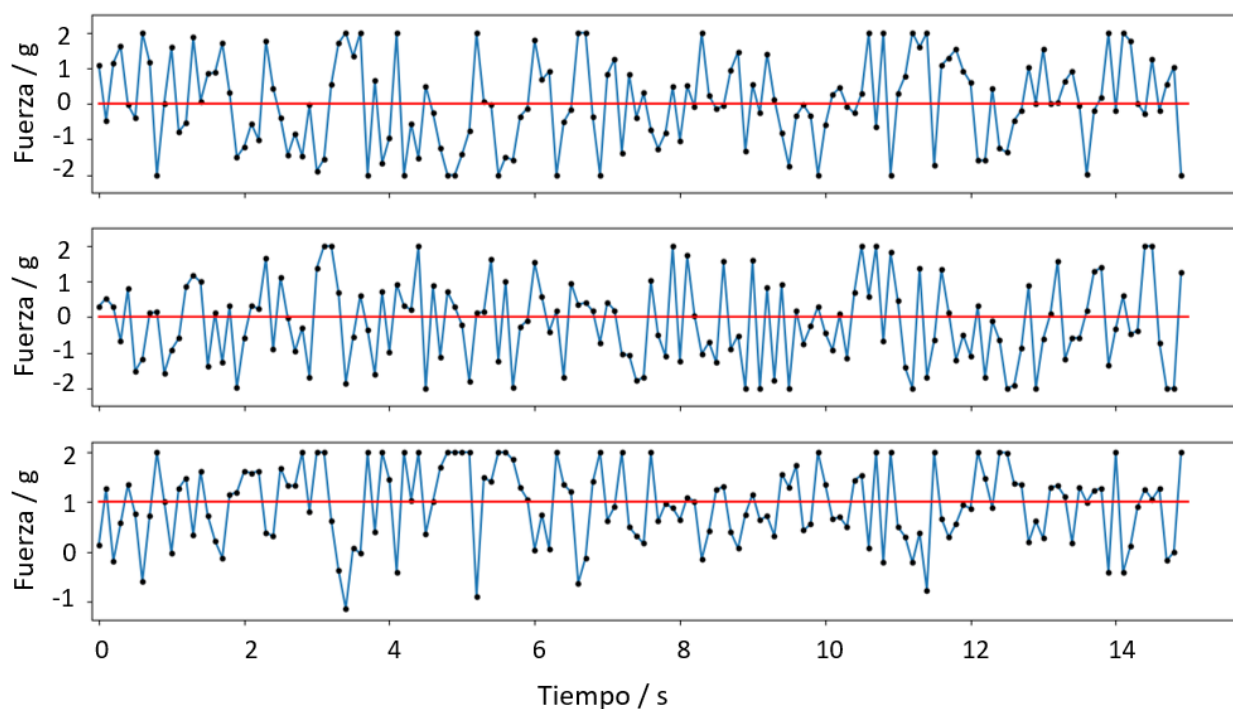


Figura 4.2: Aceleración en fuerza G que sufren los 3 ejes cartesianos. Cada gráfica representa un eje: gráfica superior eje X, medio eje Y e inferior eje Z. Las rectas rojas indican el punto de reposo de cada eje.

fuerza en estado de reposo ya que es la fuerza que contrapone a la tierra para mantenerse en pie.

En la figura 4.3 se pueden observar el conjunto de puntos tomados equivalentes a la figura 4.2 pero representados en función de su orientación y de su fuerza, indicando su magnitud en los ejes X e Y. La función aproximada de este conjunto se ve representada por la recta en rojo, con su función indicada en la gráfica.

En el mapa de calor expuesto en al subfigura 4.4(a) se puede observar la concentración de los datos entorno a $\pm 0,5$ en el eje Y y $\pm 0,5$ en el eje X, con una ligera desviación en el margen derecho de la representación. Se puede apreciar que no había apenas viento dado que los datos pueden registrar valores máximos de ± 4 G y aquí solo se aprecia un rango de 0,1 G en ambos ejes.

En gráfica de la subfigura 4.4(a) se han representado la variación de los datos aplicando un zoom para poder apreciar mejor su concentración, no obstante en la subfigura 4.4(b) se representan sin aplicar ningún zoom para apreciar su relación con sus posibles valores máximos y mínimos.

Los datos observados en las gráficas 4.4, 4.3 y 4.2 corresponden al mismo conjunto de datos pero con 4 posibles representaciones.

En la subfigura 4.5(a) se observa un conjunto de datos tomados en 4 veces. Este conjunto de datos se ha tomado en el gimnasio IES Valle Inclán ilustrado en el plano 4.1 a una altura de 50 cm. Se puede observar la dirección del viento, proveniente de la pared inferior de 10 m. El foco del viento está situado

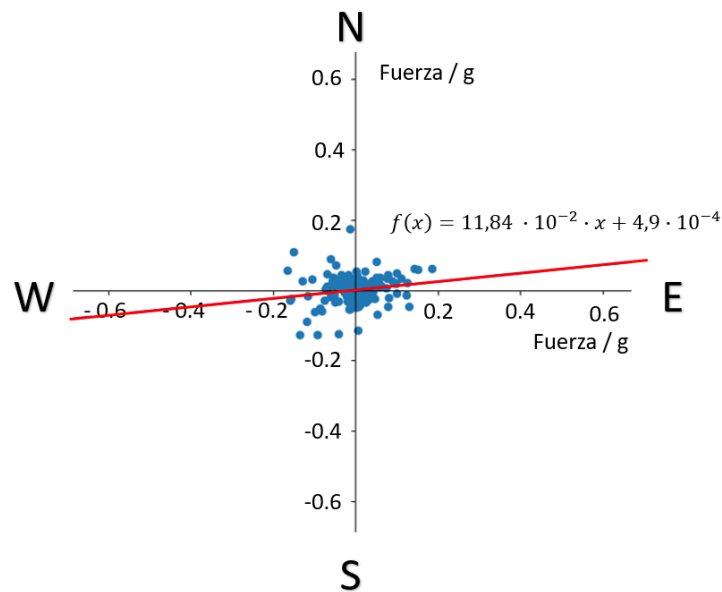


Figura 4.3: Puntos tomados en función de su orientación y en fuerza G. La recta roja indica la representación aproximada de los datos, dirección.

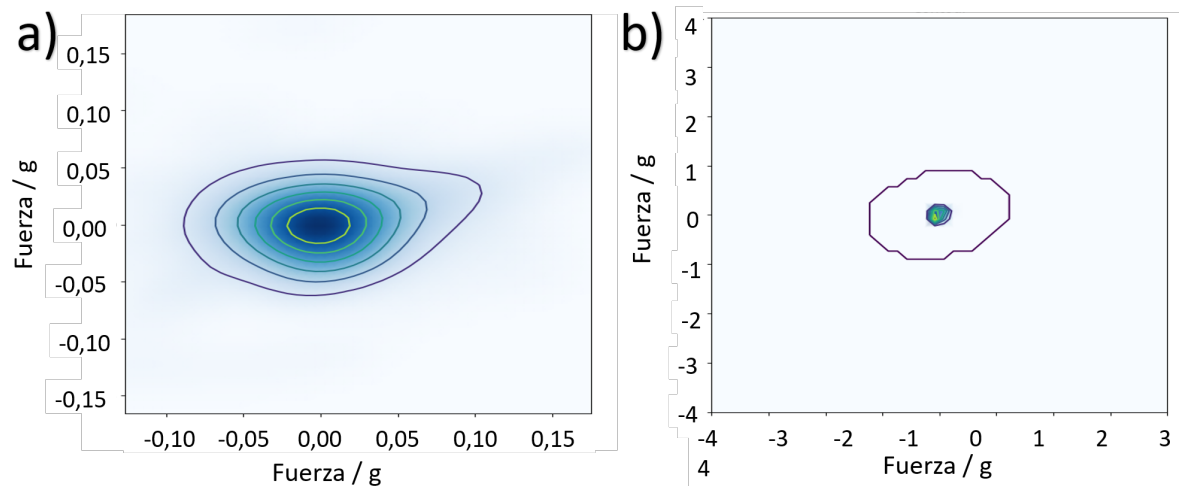


Figura 4.4: Mapa de calor con ampliación en el conjunto de datos y sin zoom, observando la relación con los límites posibles. Figura (a), muestra representación de concentración de puntos delimitados con isobaras. Figura (b), muestra un mapa de calor con escala máxima de ± 4 G. Se puede observar que no hay casi variación y la concentración de los puntos está entorno al origen de la gráfica.

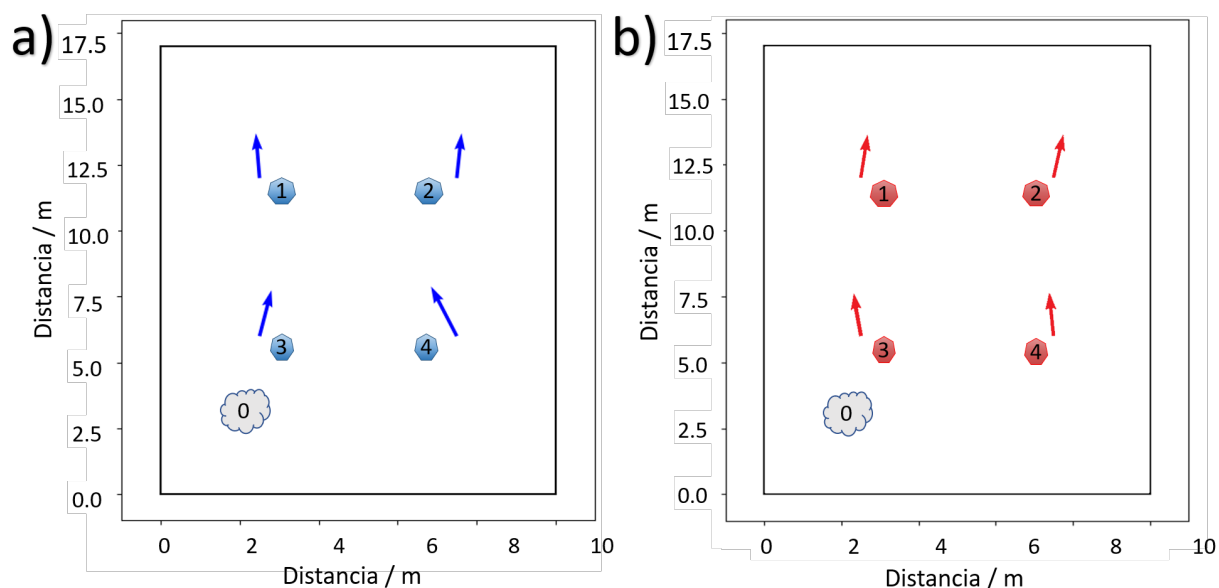


Figura 4.5: Se muestra los datos medidos en dos planos distintos, coteniendo ambos los vectores de dirección de viento, en los puntos 1,2,3,4 con un foco de viento situado en el punto 0. Se muestra en figura (a) el plano 0 y en la figura (b) el plano 1.

en el punto 0 representado; aunque en el punto 4 el vector de viento no debería tener esa dirección, la puerta del almacén afectó a la toma de las medidas, creando una circulación de aire desde dicha puerta hasta la puerta principal situada en el centro de la sala.

Al igual que en la subfigura 4.5(a) del plano z_0 , hay una toma de datos para el plano z_1 4.5(b) con una altura aproximada de 2,5 m. Se puede observar una dirección similar a la vista en la figura 4.5(a).



Figura 4.6: Foto panorámica del gimnasio desde la puerta principal. Puntos de toma de datos representados acorde con las figuras 4.1 y 4.7.

En la figura 4.6 se indican los puntos de toma de datos con el foco de viento y está representado el eje de coordenadas en la esquina inferior derecha. Estos puntos son los que se han cogido como referencia a la hora de tomar los datos y posteriormente representarlos en las gráficas de esta sección.

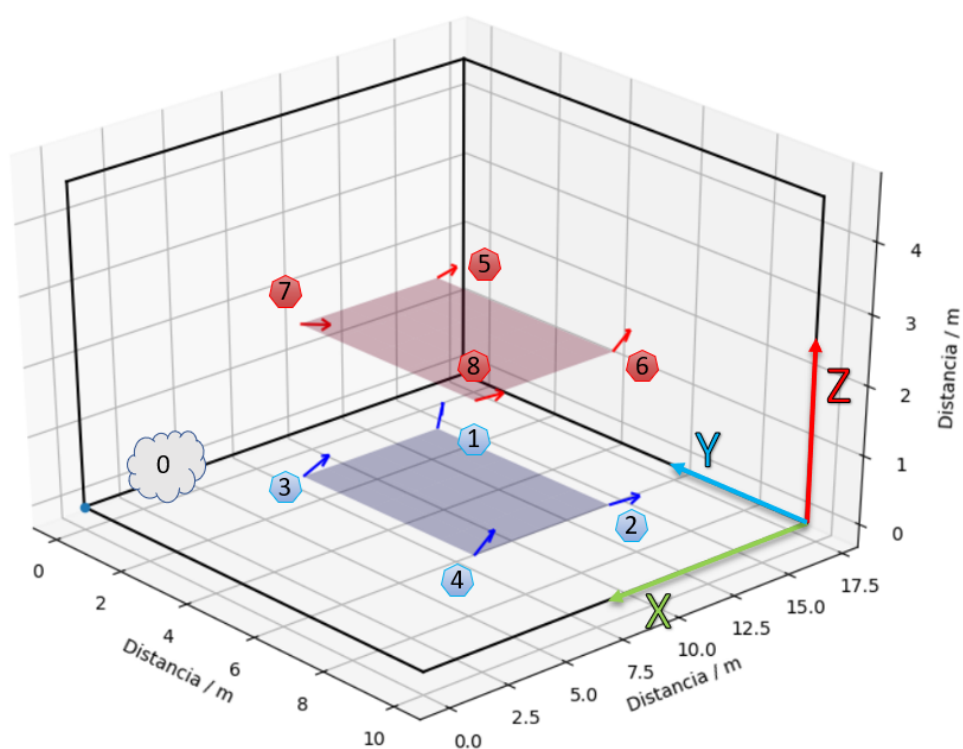


Figura 4.7: En esta gráfica 3D se representa virtualmente la imagen 4.6 concordando los puntos indicados y el foco de viento. Los datos representados en esta figura consolidan el buen funcionamiento del dron con el sensor de viento, sirviendo como base para realizar la toma de medidas en un entorno al aire libre

Como se puede observar en la figura 4.7, en ambos planos aparecen 4 vectores que están enfocando hacia la misma dirección con diferentes módulos, indicando la fuerza del viento en ese punto. Se puede apreciar también la altura que toma el vector, obteniendo así un módulo de acorde a un módulo de 3 componentes, X, Y y Z. La representación de datos obtenidos en un entorno cerrado como es el gimnasio de IES Valle Inclán son muy prometedores, sirviendo como base para llevar a cabo en un futuro mediciones al aire libre y observar su comportamiento en un entorno real.

CONCLUSIÓN

Para realizar el estudio de los gases que componen la atmósfera hay que tener en cuenta su comportamiento como por ejemplo, de dónde vienen y hacia dónde van. Los gases se desplazan por dos causas distintas: por difusión y por conducción, el método de difusión consiste en el desplazamiento de los gases, generalmente, en un entorno cerrado mediante el equilibrio de sus presiones parciales. Por otro lado la conducción de gases consiste en el desplazamiento de un gas por efecto de otro gas de presión menor, como por ejemplo el viento. Para medir el viento se utilizan sistemas como la veleta potenciométrica [4] para medir la velocidad y dirección del viento, pudiendo diferenciar diferentes métodos de medición de velocidad de viento como: estándar o de copas, filamento caliente, empuje, compresión tubo de Pitot, multisondas, láser, esférico y ultrasónico, descritos en el capítulo 2. No obstante, con los avances tecnológicos desarrollados en los últimos años, se pueden utilizar sensores más modernos como las IMU, sensores que registra la orientación, inclinación y aceleración; minimizando así el tamaño del sistema y pudiendo instalarlos en una plataforma portátil.

Una vez analizados todos los diferentes sistemas de medición de viento, se ha utilizado una IMU, en este caso formada por el sensor MPU9250, que contiene a su vez el sensor MPU6050 y el AK8963, el sensor MPU6050 se encarga de la inclinación y orientación mientras que el AK8963 solo de la orientación. Se ha diseñado y codificado un software en python3 para la obtención y gestión de datos, así como para su representación de datos de forma adecuada en las gráficas del capítulo 4. Se ha instalado el sensor de viento descrito en un cuadrotor, dron de 4 motores, permitiendo así la toma de datos de forma sencilla en diferentes puntos. Para poder instalar la sensorización en el dron se ha tenido que diseñar e imprimir una serie de piezas 3D, ilustradas en la figura 3.5 (b), permitiendo de esta forma instalar tanto el sensor de viento diseñado como otros posibles tipos de sensorización, como sistemas de medición de temperatura, humedad, presión e incluso una estación meteorológica. Los datos obtenidos mediante el sensor de viento creado son bastante satisfactorios, se puede observar la desviación que produce en viento en el cuadrotor mediante las figuras: 4.2, 4.3, 4.4(a), 4.4(b), 4.5(a), 4.5(b) y 4.7.

Para proseguir con este trabajo se puede partir por desarrollar un sistema de viento más completo utilizando sensores más sofisticados o precisos como un anemómetro láser doppler o alguno de los descritos en el capítulo 2. Por otra parte, la plataforma donde se ha instalado el sensor de viento

desarrollado, un cuadrotor, se puede modificar instalando otros componentes o se puede llevar a cabo una reestructuración utilizando un dron de ala fija para maximizar de esta forma el tiempo de vuelo pero sacrificando la versatilidad que ofrece un dron de ala rotatoria. Otro campo que puede implementarse es el desarrollo de un sistema de conducción autónomo agilizando la toma de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. E. Hansen, M. Sato, A. Lacis, R. Ruedy, I. Tegen, and E. Matthews, "Perspective Climate forcings in the Industrial era," tech. rep., 1998.
- [2] K. George, L. Ziska, J. Bunce, B. Quebedeaux, and L. H. Ziska, "Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban–rural transect," *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 7654–7665, nov 2007.
- [3] J. V. Noble, D. J. D. S. Price, J. V. Noble, D. J. D. E. S. Price, J. Stuart, and N. Revett, "The Water Clock in the Tower of the Winds Linked references are available on JSTOR for this article : The Water Clock in the Tower of the Winds," *American Journal of Archaeology*, vol. 72, no. 4, pp. 345–355, 2019.
- [4] J. Mur, "Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética," *Measurement Science and Technology*, vol. 1, pp. 10–36, 2012.
- [5] A. In, "Cup, propeller, vane and sonic Anemometers in turbulence research," pp. 399–423, 1981.
- [6] H. W. A. IndiaMART, "<https://www.indiamart.com/proddetail/hot-wire-anemometer-18181629130.html>," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-17).
- [7] H.-w. Anemometry and G. Comte-bellot, "Hot-wire anemometry," *Ecole Centrale de Lyon*, no. 8088, pp. 209–231, 1976.
- [8] [Http://www.sabelotodo.org/aparatos/anemometro.html](http://www.sabelotodo.org/aparatos/anemometro.html), "Funcionamiento y tipos de anemómetros," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-17).
- [9] Extech, "Extech HD350: Pitot Tube Anemometer + Differential Manometer. URL: <http://www.extech.com/display/?id=14482>," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-17).
- [10] NASA, "Five hole probe calibration," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-17).
- [11] P. T. Anemometer, "United States Patent Office," 2009, Patente EEUU nº:2701474.
- [12] M. Hölling, B. Schulte, S. Barth, and J. Peinke, "Sphere anemometer - A faster alternative solution to cup anemometry," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 75, no. 1, 2007.
- [13] C. Tropea, "Laser doppler anemometry: Recent developments and future challenges," *Measurement Science and Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 605–619, 1995.
- [14] J. Puczyłowski, "2d-Laser Cantilever Anemometer," 2014, (Fecha de acceso: 2019-06-17).
- [15] F. Durst, "Principles of laser Doppler anemometers," vol. 1, p. 11, 1980.
- [16] H.-E. Albrecht, N. Damaschke, M. Borys, and C. Tropea, *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] S. Prudden, A. Fisher, A. Mohamed, and S. Watkins, "A flying anemometer quadrotor: Part 1," *Proceedings of the 7th International Micro Air Vehicle Conference and Competition - Past, Present and Future*, pp. 1–7, 2016.

- [18] P. J. Hiltner, "The drones are coming: Use of unmanned aerial vehicles for police surveillance and its fourth amendment implications," vol. 3, p. 397, 2013.
- [19] F. B. Pozuelo, *Fotogrametría analítica*. 2003. Edicions UPC S.L. 1a Edicion, ISBN: 9788483016718.
- [20] P. J. Hardin and R. R. Jensen, "Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities," *GIScience & Remote Sensing*, vol. 48, no. 1, pp. 99–111, 2011.
- [21] J. Moyano Cano, "Quadrotor UAV for wind profile characterization," pp. 14–15, Univesidad Carlos III, 2013.
- [22] J. Reuder, P. Brisset, M. Jonassen, M. Müller, and S. Mayer, "The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 18, no. 2, pp. 141–147, 2009.
- [23] P. Buschmann, Marco and Bange, Jens and Vörsmann, "6.7 MMAV-A Miniature Unmanned Aerial Vehicle (MINI-UAV) for meteorological purposes," 2019.
- [24] N. Wildmann, M. Hofsäß, F. Weimer, A. Joos, and J. Bange, "MASC a small Remotely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research," *Advances in Science and Research*, vol. 11, no. 1, pp. 55–61, 2014.
- [25] X. Xiang, Z. Wang, Z. Mo, G. Chen, K. Pham, and E. Blasch, "Wind field estimation through autonomous quadcopter avionics," in *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [26] Oscar Serrano, "Variador electrónico (ESC): Qué es y cómo funciona | FpvMax. URL: <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-04).
- [27] "<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-13).
- [28] F. Leens, "An introduction to I2C and SPI protocols," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 12, pp. 8–13, 2009.
- [29] A. Industries, "PCA9685 Adafruit Code. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_PCA9685," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-04).
- [30] Eric, "Comunicación radiocontrol FSIA6B. URL: <http://learningrc.com/rc-communication-protocols/>," 2017, (Fecha de acceso: 2019-06-04).
- [31] I. Act, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," pp. 1–3, 2011.
- [32] T. O. J. T. Graves, D. R. Wilkins, and M. Corr, "COPY OF A LETTER FROM SIR WILLIAM R. HAMILTON On Quaternions ; or on a new System of Imaginaries in Algebra . By Sir," *Philosophical Magazine*, vol. 25, no. 1844, 1999.
- [33] ECalc, "<https://www.ecalc.ch/index.htm>," 2019, (Fecha de acceso: 2019-06-04).

DEFINICIONES

Comunicación I2C I2C, es un protocolo de comunicación que cuenta con 2 cables: uno de ellos (SCL) indica los pulsos de reloj y el otro (SDA) se encarga de transportar los datos. Al contar con un único cable de datos y ser capaz de comunicar dos o más dispositivos es necesario un maestro que se encargue de mediar la comunicación [28].

Comunicación Puerto Serie Puerto serie, es un protocolo de comunicación digital que aplica la serialización, conversión de los datos a nivel de byte a una serie de pulsos para que puedan ser enviados y recibidos, existen diferentes tipos: UART usado por la Raspberry, USART, EUSART.

Comunicación SPI SPI, es un protocolo de comunicación usado habitualmente para la transferencia de datos entre equipos electrónicos. Formado por un total de 4 conexiones: CLK o reloj de sincronización, envío de datos, recepción de datos y un Enable que permite recibir datos en caso de estar activo o negarlos en caso de estar inactivo, de esta forma se puede utilizar el SPI para comunicarse con varios sensores utilizando multiplexación mediante el pin de enable [28].

Dron de ala fija Dron de ala fija, se define como dron de ala fija aquel que cuenta con una o varias alas fijas en su parte superior, dotándole así de la capacidad de planear.

Dron de ala rotatoria Dron de ala rotatoria, se define como dron de ala rotatoria aquel que mediante el movimiento de una o varias alas sobre un eje fijo permite volar el objeto.

ACRÓNIMOS

- CAD** Computer Assisted Design.
- CCW** Counter ClockWise.
- CO₂** Dióxido de Carbono.
- CW** ClockWise.
- ESC** Electronic Speed Controller.
- IES** Instituto de Educación Secundaria.
- IMU** Inercial Measure Unity.
- KV** Kilo Voltage.
- L-ion** Ion Litio.
- LiPo** Polímero de Ion Litio.
- N** Newton.
- NiCd** Niquel Cadmio.
- PDB** Pluggable Database.
- ppm** Parts Per Million.
- PWM** Pulse width modulation.
- SI** Sistema Internacional.
- TFG** Trabajo final de grado.

APÉNDICES

ESTUDIO TÉCNICO DE COMPONENTES

PARA DRON

Se han realizado numerosas configuraciones para estabilizar tiempo de vuelo y carga máxima del dron, obteniendo el mejor resultado en la imagen de a continuación A.1.



Figura A.1: En esta imagen se muestran los datos obtenidos mediante una herramienta de internet, eCalc [33], para el estudio de componentes para dron.

CÓDIGO DISEÑADO PARA PLACA

CONTROLADORA

Para el control del dron, he tenido que iniciar varios sistemas estructurandolos en recepción, gestión y emisión; estos sistemas se ven en la figura B.1 como S1, S2 y S3.

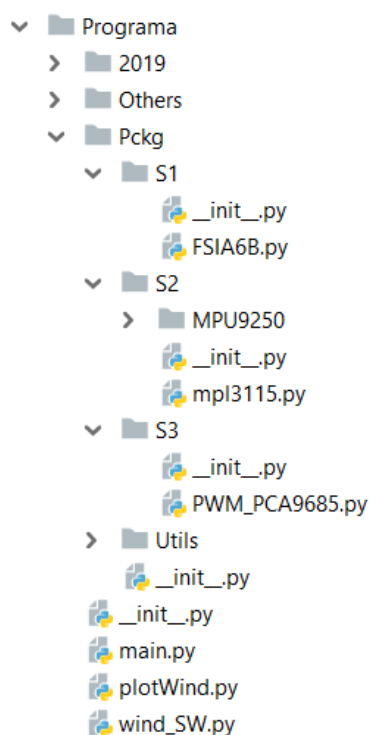


Figura B.1: Estructura de programa controlador de vuelo

Código B.1: Se muestra el main después de incluir todas las librerías oportunas.

```
11 if __name__ == '__main__':  
12  
13     #Comunicaciones  
14     port = serial.Serial("/dev/ttyS0", parity=serial.PARITY_NONE, stopbits=serial.STOPBITS_ONE,  
15                          baudrate=115200)  
    s1_fsia6b = FSIA6B.FSIA6B(port)
```

Código B.2: Se muestra el main despues de incluir todas las librerias oportunas.

```

11
12     #Sensores
13     mpu9250 = MPU9250_lib.MPU9250()
14
15     #Motores
16     #Establecemos la frecuencia del pwm a 2000Hz (1560Hz en output)
17     pwm = PWM_PCA9685.PWM_PCA9685(2000)
18
19     mpu6050Sensor = MPU6050.MPU6050(1,0x68)
20
21     mpu6050Sensor.dmp_initialize()
22     mpu6050Sensor.set_DMP_enabled(True)
23
24     entrada = input("Desea calibrar el giroscopio[1] o cargar la anterior configuración[2]? \nTenga en
        cuenta que la orientación puede cambiar: ")
25     if entrada == '1':
26         calibracion = mpu6050Sensor.calibrarGyro()
27     elif entrada == '2':
28         mpu6050Sensor.setGyroOffset(0.5238688792890147, 2.561511257439358, -6.6875060365656696)
29
30     barometer = mpl3115.MPL3115()
31     barometer.config(True,102200)
32
33     print("Open:", port.is_open)
34     port.reset_input_buffer()
35     error = 0
36     while True:
37         try:
38             channels = s1_fsia6b.getChannelsFromReceiver()
39         except:
40             print("ERROR_CHANNELS", channels)
41             print("Error en Comunicacion_.....
                COMUNICACION!!!!!!")
42             print("Settings:", port.get_settings())
43
44             channels = [1500, 1500, 1000, 1500, 1000, 1000]
45             sleep(5)
46             error = 1
47
48             altimetro = barometer.read_data()
49             # Cambiar lectura de mpu9250
50             # sensores = mpu9250.readSensoresConCalibracion()
51             sensores = mpu6050Sensor.readSensoresConCalibracion()
52             pwm.setDutyPWM_Dron(channels,sensores,altimetro['alt'])
53         try:
54             port.reset_input_buffer()
55         except:
56             pass

```

CÓDIGO DE REGISTRO DEL VIENTO

Para las pruebas realizadas se ha diseñado y codificado un programa en python con dos métodos de registro de datos. El primero para una sola toma y el segundo para un conjunto de datos, definidos como una matriz. Para ambos métodos se ha de indicar al inicio del programa el tiempo de medición, tomando por cada segundo un total de 10 muestras, este número se puede incrementar o disminuir.

Código C.1: En este código se muestra el protocolo del main para registrar las medidas en sus dos modos, una sola toma de datos o varias.

```
1  if __name__ == '__main__':
2
3      confirmacion = "n"
4
5      print("Tomar_una_o_varias_medidas:\n\t1-Una_medida\n\t2-Varias_medidas")
6      opcion = input("\nOpcion:")
7      if int(opcion) == 1:
8          print("\nTomar_una_sola_medida_seleccionado")
9      elif int(opcion) == 2:
10         print("\nTomar_varias_medidas_seleccionado")
11         while confirmacion == 'n':
12             filas = input("Indique_el_numero_de_filas:")
13             columnas = input("Indique_el_numero_de_columnas:")
14             alturas = input("Indique_el_numero_de_alturas:")
15
16             print("Desea_hacer_una_medicion_de:", filas, "x", columnas, "x", alturas, "?")
17             confirmacion = raw_input("Yes(Y)-No(n)")
18             if confirmacion == 'n' or confirmacion == 'N':
19                 print("\n\nIndique_de_nuevo_las_medidas.")
20
21         tiempo = raw_input("Indique_el_tiempo_de_medida_(default=_10_s):")
22         if tiempo == "":
23             tiempo = 10
24         print("Tiempo_de_medicion:_", tiempo, "seg")
25
26
27         wm = WindMeasure(tiempo)
```

Código C.2: En este código se muestra el protocolo del main para registrar las medidas en sus dos modos, una sola toma de datos o varias.

```
28
29     if int(opcion) == 1:
30         print("Inicio_de_toma_de_medida_iniciado_...")
31         wm.registrar_medidas()
32     elif int(opcion) == 2:
33         print("Inicio_de_toma_de_medidas_iniciado_...")
34         for h in range(alturas):
35             for row in range(filas):
36                 for col in range(columnas):
37                     wm.registrar_medidas()
38
39     print("Fin_de_toma_de_datos")
```


CÓDIGO DE GRÁFICA DE VIENTO BRÚJULA

Código D.1: Código de gráfica para imagen 4.3

```

1  def thirdPlot_v2(ruta,fichero):
2
3      margenPlot = 0.5
4      maxValueData = 90
5
6      #consigue los valores de varianza roll y pitch
7      x,y = getXY(fichero,14,15,True)
8      #consigue la fuerza del viento
9      z = getDataFromFile(fichero,13,True)
10
11     for enum,each in enumerate(z):
12         x[enum] = x[enum] / maxValueData *each
13         y[enum] = y[enum] / maxValueData *each
14
15     maxX = max(x) + margenPlot
16     maxY = max(y) + margenPlot[indexY]
17
18     maxAxisValue = 0
19     if maxX > maxY:
20         maxAxisValue = maxX
21     else:
22         maxAxisValue = maxY
23
24     fig = plt.figure()
25     ax = fig.add_subplot(1,1,1)
26     plt.scatter(x, y)
27     plt.xlim(-maxAxisValue, maxAxisValue)
28     plt.ylim(-maxAxisValue, maxAxisValue)
29
30     ax.spines['left'].set_position('center')
31     ax.spines['bottom'].set_position('center')
32     p1 = np.polyfit(x, y, 1)
33     x2 = np.array((-2, 2))
34     x2 = np.array((-maxAxisValue, maxAxisValue))
35     # print("pendiente", p1[0], "corte", p1[1])
36     ax.plot(x2, p1[0] *x2 + p1[1], "b")
37     guardarImagen(rutaPlot, fichero, fig,3)

```


CÓDIGO DE GRÁFICA DE VIENTO MAPA DE CALOR

Código E.1: Código de gráfica para imagen 4.4(a)

```
1 def heatmap(rutaPlot, fichero):
2     margenPlot = 0.5
3     maxValueData = 90
4
5     # consigue los valores de varianza roll y pitch
6     x, y = getXY(fichero, 14, 15, True)
7     # consigue la fuerza del viento
8     z = getDataFromFile(fichero, 13, True)
9
10    for enum, each in enumerate(z):
11        x[enum] = x[enum] / maxValueData *each
12        y[enum] = y[enum] / maxValueData *each
13
14    maxX = max(x) + margenPlot
15    maxY = max(y) + margenPlot
16
17    maxAxisValue = 0
18    if maxX > maxY:
19        maxAxisValue = maxX
20    else:
21        maxAxisValue = maxY
22
23    x = np.array(x)
24    y = np.array(y)
25    data = np.stack((x, y), axis=-1)
26
27    # Create a figure with 6 plot areas
28    fig, axes = plt.subplots(ncols=2, nrows=1, figsize=(21, 5))
29
30    nbins = 50
31
32    k = kde.gaussian_kde(data.T)
33    # xi, yi = np.mgrid[-maxAxisValue:maxAxisValue:nbins *1j, -maxAxisValue:maxAxisValue:nbins *1j]
34    xi, yi = np.mgrid[-4:4:nbins *1j, -4:4:nbins *1j]
35    # xi, yi = np.mgrid[y.min():y.max():nbins *1j, x.min():x.max():nbins *1j]
36    zi = k(np.vstack([xi.flatten(), yi.flatten()]))
37
38    axes[0].set_title('2D_Density_with_shading')
```

Código E.2: Código de gráfica para imagen 4.4(a)

```
39 axes[0].pcolormesh(xi, yi, zi.reshape(xi.shape), shading='gouraud', cmap=plt.cm.Blues)
40
41 # contour
42 axes[1].set_title('Contour')
43 axes[1].pcolormesh(xi, yi, zi.reshape(xi.shape), shading='gouraud', cmap=plt.cm.Blues)
44 axes[1].contour(xi, yi, zi.reshape(xi.shape))
45 guardarImagen(rutaPlot,fichero,fig,4)
46 # plt.show()
```

CÓDIGO DE GRÁFICA DE VIENTO 2D

Para la ilustración de un mapa 2D con 4 vectores se ha tenido que realizar una conversión de un conjunto de puntos en un vector con dos direcciones.

Código F.1: Código de gráfica para imagen 4.5(a) y 4.5(b)

```
1  def mapaViento2D(rutaPlot):
2
3      margenPlot = 0.5
4      maxValueData = 90
5
6      fig = plt.figure()
7
8      numDatos = input("Numero_de_conjunto_de_datos,_pon_4:")
9
10     xVector = list()
11     for i in range(int(numDatos)):
12         fichero = util.cargadorFich(rutaFull)
13         # consigue los valores de varianza roll y pitch
14         x, y = getXY(fichero, 14, 15, True)
15         # consigue la fuerza del viento
16         z = getDataFromFile(fichero, 13, True)
17
18         for enum, each in enumerate(z):
19             x[enum] = x[enum] / maxValueData *each
20             y[enum] = y[enum] / maxValueData *each
21
22         p1 = np.polyfit(x, y, 1)
23         xVector.append(p1[0])
24
25     plt.xlim(-1,11)
26     plt.ylim(-1,18)
27
28     plt.xlabel("Distancia_/_m")
29     plt.ylabel("Distancia_/_m")
30
31     origin = [7.5], [12] # origin point
```

Código F.2: Código de gráfica para imagen 4.5(a) y 4.5(b)

```
61     tam = np.sqrt(xVector[0]*xVector[0]+1)
62     print(tam)
63     plt.quiver(*origin, xVector[0], 1, color='b', scale=10/tam)
64     origin = [2.5], [12] # origin point
65     tam = np.sqrt(xVector[1]*xVector[1]+1)
66     print(tam)
67     plt.quiver(*origin, xVector[1], 1, color='b', scale=10/tam)
68     origin = [7.5], [6] # origin point
69     tam = np.sqrt(xVector[2]*xVector[2]+1)
70     print(tam)
71     plt.quiver(*origin, xVector[2], 1, color='b', scale=10/tam)
72     origin = [2.5], [6] # origin point
73     tam = np.sqrt(xVector[3]*xVector[3]+1)
74     print(tam)
75     plt.quiver(*origin, xVector[3], 1, color='b', scale=10/tam)
76
77     plt.plot((0, 0), (0, 17), 'k')
78     plt.plot((0, 10), (0, 0), 'k')
79     plt.plot((0, 10), (17, 17), 'k')
80     plt.plot((10, 10), (17, 0), 'k')
81     guardarImagen(rutaPlot, fichero, fig,5)
```

CÓDIGO DE GRÁFICA DE VIENTO 3D

La ilustración de los datos en 3D ha tenido que llevar a cabo una conversión de un conjunto de puntos variables en un vector, conformando de esta forma un mapa 3D de 8 vectores.

Código G.1: Código de gráfica para imagen 4.7

```
1 def mapaViento3D(rutaPlot):
2     fig = plt.figure()
3     ax = fig.gca(projection='3d')
4
5     # Posiciones de los vectores
6     yPos = (6, 6, 12, 12)
7     xPos = (2.5, 7.5, 2.5, 7.5)
8     zPos = (0.3, 0.3, 0.3, 0.3)
9
10    margenPlot = 0.5
11    maxValueData = 90
12
13    numDatos = 4
14
15    w = list()
16    xVector = list()
17    for i in range(int(numDatos)):
18        fichero = util.cargadorFich(rutaFull)
19        # consigue los valores de varianza roll y pitch
20        x, y = getXy(fichero, 14, 15, True)
21        # consigue la fuerza del viento
22        z = getDataFromFile(fichero, 13, True)
23
24        for enum, each in enumerate(z):
25            x[enum] = x[enum] / maxValueData *each
26            y[enum] = y[enum] / maxValueData *each
27
28        p1 = np.polyfit(x, y, 1)
```

Código G.2: Código de gráfica para imagen 4.7

```

29     xVector.append(float(p1[0]))
30     z = np.array(z)
31     w.append(np.mean(z))
32
33     for enum,i in enumerate(w):
34         i -=1
35         w[enum] = i
36     v = (1, 1, 1, 1)
37
38     ax.quiver(xPos, yPos, zPos, xVector, v, w, color='b')
39
40     zPos=(2.5, 2.5, 2.5, 2.5)
41
42     w = list()
43     xVector = list()
44     for i in range(int(numDatos)):
45         fichero = util.cargadorFich(rutaFull)
46         # consigue los valores de varianza roll y pitch
47         x, y = getXY(fichero, 14, 15, True)
48         # consigue la fuerza del viento
49         z = getDataFromFile(fichero, 13, True)
50
51         for enum, each in enumerate(z):
52             x[enum] = x[enum] / maxValueData *each
53             y[enum] = y[enum] / maxValueData *each
54
55         p1 = np.polyfit(x, y, 1)
56         xVector.append(float(p1[0]))
57         z = np.array(z)
58         w.append(np.mean(z))
59
60     for enum, i in enumerate(w):
61         i -= 1
62         w[enum] = i
63     v = (1, 1, 1, 1)
64
65     ax.quiver(xPos, yPos, zPos, xVector, v, w, color='r')
66
67     #Rectas margen
68     #Plano 0
69     ax.plot((0, 0), (0, 17), (0), 'k')
70     ax.plot((0, 10), (0, 0), (0), 'k')
71     ax.plot((0, 10), (17, 17), (0), 'k')
72     ax.plot((10, 10), (17, 0), (0), 'k')
73
74     #Verticales
75     ax.plot((0, 0), (0, 0), (0,4.6), 'k')
76     ax.plot((10, 10), (17, 17), (0,4.6), 'k')
77     ax.plot((0, 0), (17, 17), (0,4.6), 'k')
78     # ax.plot((10, 10), (0, 0), (0,4.6), 'k')

```


Código G.3: Código de gráfica para imagen 4.7

```
79     #Plano 1
80     ax.plot((0, 0), (0, 17), (4.6), 'k')
81     # ax.plot((0, 10), (0, 0), (4.6), 'k')
82     ax.plot((0, 10), (17, 17), (4.6), 'k')
83     # ax.plot((10, 10), (17, 0), (4.6), 'k')
84
85
86     y = np.arange(6, 13, 1)
87     x = np.arange(2.5, 8.5, 1)
88     X, Y = np.meshgrid(x, y)
89
90     Z = X *0.0 +0.3
91     ax.plot_surface(X, Y, Z, cmap='seismic', alpha=0.3)
92     Z += (2.5 -0.3)
93     ax.plot_surface(X, Y, Z, cmap='RdBu', alpha=0.3)
94
95     ax.scatter(0,0,cmap='k')
96     ax.set_xlabel('Distancia_/_m')
97     ax.set_ylabel('Distancia_/_m')
98     ax.set_zlabel('Distancia_/_m')
99
100     # plt.show()
101     guardarImagen(rutaPlot, fichero, fig,6)
```

